

引用格式: 李文渊, 2022. 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 793–820. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222810](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222810)

Citation: LI W Y, 2022. Study of ore-forming theoretical innovation and prospecting breakthrough of magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits in China [J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 793–820. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222810](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222810)

中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破

李文渊^{1,2,3}

LI Wenyan^{1,2,3}

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;
 3. 中国–上海合作组织地学合作研究中心, 陕西 西安 710054
1. *Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*
 2. *Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*
 3. *China-SCO Geosciences Research Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

Study of ore-forming theoretical innovation and prospecting breakthrough of magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits in China

Abstract: Chinese magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposit is the main source of strategic key metal resources, such as nickel, cobalt and platinum group elements in China, and it is an important deposit type with a future value that needs special attention. This type of deposit comes from the mafic and ultramafic magma formed by the upper mantle, especially the asthenosphere, and the immiscible (liquation) action between sulfide liquid–silicate melt is the main mineralization mechanism. They are mainly formed in two geological settings: the continental rift and the extended environment in the orogenic zone. China is a major producer of magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits, but compared with the world it is relatively unique. Most magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits in the world are formed in the ancient craton, and are the result of the mantle plume geodynamics. Archeozoic–early Proterozoic komatiite nickel–cobalt sulfide deposits is a distinct metallogenic characteristics. Ancient komatiite-related nickel–cobalt sulfide deposits have been rarely discovered in China, and their mineralization age is relatively late, mainly in the Neoproterozoic, Early and Late Paleozoic. The Neoproterozoic is represented by the Jinchuan super-large deposit with nickel metal reserves ranked the third in the world, and the Early Paleozoic by the Xiarihamu super-large deposit discovered in the prospecting breakthrough of recent years. The Xiarihamu deposit is also the only super-large magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposit found in the Tethys orogenic belt in the world. Mineralization theory of “big magma–deep immiscibility–injection” and “forming big ore deposits in small intrusive rocks” proposed by Chinese scholars based on China’s prospecting practice has been widely accepted and applied by field geological exploration workers, and has made important prospecting breakthrough discoveries. At the same time, it has been recognized by foreign peers, which changed the traditional metallogenic understanding of magma copper–nickel–cobalt sulfide deposits. The extensive distribution of magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits in orogenic belts is an important feature of such deposits in China. According to the different evolution of orogenic zones and metallogenic history, it can be divided into two important types: Tethys type and Central Asian type. The Tethys type is represented by the Xiarihamu ore deposit, and it is the product of the Tethys structural transformation, which the Paleo-Tethys cracking after the Proto-Tethys orogeny; the Central Asian type is

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2019YFC0605201)

The research is financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFC0605201)

第一作者简介: 李文渊 (1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩浆硫化物矿床和区域成矿学研究。E-mail: xalwenyuan@126.com

收稿日期: 2022–04–29; 修回日期: 2022–07–10; 责任编辑: 王婧

represented by a large number of the early Permian of the Late Palaeozoic magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits distributed in the Eastern Tianshan–Beishan and Altai zones of the Central Asian Orogenic belt, which is the result of the dual geodynamics mechanism of plate tectonics and mantle plume. China's magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposit has huge prospecting potential, and the Jinchuan deposit as a result of nappe structure from deep horizontal “sill” thrust to the surface of the inclined “dyke”, it still has significant prospecting potential in its deep and marginal locations, in which important new ore bodies have been found at both ends of the ore-bearing rock body; more than 10 new ore deposits (points) have been found in East Kunlun and its adjacent areas, where the Xiarihamu deposit is located. In the region, the southeastern margin of Tarim Landmass, the northern margin of Tarim Landmass, the western margin of Yangtze Landmass and the northeast margin of North China Landmass are the exploration prospect areas to strengthen prospecting, while the northern margins of Yangzi Landmass and North China land block are the new prospecting areas for urgent investigation.

Keywords: magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposit; deep immiscibility; forming large ore deposits in small intrusive rocks; mineralization types; mineral prospecting potential

摘 要: 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床是国家镍、钴、铂族元素等战略性关键金属资源的主要来源,是需要特别关注的具有未来价值的重要矿床类型。该类矿床来源于上地幔,特别是软流圈的部分熔融形成的镁铁质、超镁铁质岩浆,硫化物液相–硅酸盐熔体的不混溶(熔离)作用是成矿的主要机制。它们主要形成于两种背景:大陆裂谷和造山带中的伸展环境。中国是岩浆铜镍钴硫化物矿床的产出大国,但与国外相比,形成背景和成矿动力学机制比较独特。世界上绝大多数岩浆铜镍钴硫化物矿床都形成于古老的克拉通,是地幔柱地球动力作用的结果,太古代—早元古代的科马提岩镍钴硫化物矿床是鲜明的产出特点。中国缺少古老的科马提岩有关的镍钴硫化物矿床,成矿时代相对较晚,主要形成于新元古代、晚古生代早期和晚期三个时期,新元古代以镍金属资源量居世界第三的金川超大型矿床为代表,晚古生代早期以近年来找矿突破发现的夏日哈木超大型矿床为代表。夏日哈木矿床也是迄今世界上特提斯造山带中发现的唯一一例超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床。中国学者基于中国找矿实际提出的“大岩浆–深部熔离–贯入”表现为“小岩体成大矿”的成矿理论,广泛为野外地质勘查工作者接受并应用,取得了重要的找矿突破性成果,同时为国外同行认可,改变了岩浆铜镍钴硫化物矿床传统的成矿认识。造山带中岩浆铜镍钴硫化物矿床的广泛分布是中国该类矿床的一个重要特色,按形成造山带演化和成矿历史的不同,可分为特提斯型和中亚型两种重要的类型。特提斯型以夏日哈木矿床为代表,它是特提斯构造转换,原特提斯造山后,古特提斯裂解的产物;中亚型以中亚造山带中东天山–北山、阿尔泰分布的大批晚古生代晚期早二叠世岩浆铜镍钴硫化物矿床为代表,是板块构造和地幔柱双重地球动力学机制作用的结果。中国岩浆铜镍钴硫化物矿床找矿潜力巨大,金川矿床作为水平的“岩床”被推覆至地表呈倾斜的“岩墙”产出的结果,深边部仍具有重要找矿潜力,目前已在含矿岩体两端发现了重要的新矿体;夏日哈木矿床所在的东昆仑及其邻区已发现十余处新的矿床(点)。区域上,塔里木陆块东南缘、塔里木陆块北缘、扬子陆块西缘和华北陆块东北缘是亟待加强勘查的找矿远景区,而扬子陆块北缘、华北陆块北缘是急需调查的找矿新区。

关键词: 岩浆铜镍钴硫化物矿床; 深部熔离作用; 小岩体成大矿; 成矿类型; 找矿潜力

中图分类号: P618.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 05-0793-28

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222810

0 引言

岩浆铜镍硫化物矿床是较早被认识的一种矿床,已经有一百多年的历史(Vogt, 1894)。由于一开始对它的认识就与地幔物质来源产生了联系,故而

历来被地学界关注(Craig, 1979)。板块构造成矿理论将其划归为离散构造背景的大陆裂谷环境形成的矿床(Mitchell and Garson, 1981; Robb, 2005; Frish et al., 2011),进而认为其与发源于核幔边界的地幔柱有关(Lightfoot et al., 1993, 1997; Keays, 1995, 1997;

Vogel and Keays, 1997), 并认为大多数地质历史早期形成的岩浆铜镍硫化物矿床或古老的层状杂岩中形成的以铂族元素(platinum group element, PGE; 铂(Pt)、钯(Pd)、钌(Ru)、铑(Rh)、铱(Ir)、钇(Y)、钆(Gd)六种元素的总称)为主的岩浆硫化物矿床和喷出的科马提岩岩浆镍硫化物矿床, 都是地球形成早期太古代—古元古代克拉通由于地幔柱上涌而裂解形成的(Naldrett, 1989, 2004; Horan et al., 1995; Pirajno, 2000; Arndt et al., 2003), 例如南非的Bushveld矿床、美国西部的Stilwater矿床、西澳的Kambalda矿床和加拿大的Thompson矿床等, 最有意思的是世界上最大的岩浆铜镍硫化物矿床——加拿大的Sudbury矿床, 经研究确认, 它是早元古代的陨石撞击导致地幔物质部分熔融而上侵成矿的(Tuchscherer and Spry, 2002), 但这种撞击成因的岩浆铜镍硫化物矿床目前全球也仅确认这一例。

21世纪以来, 随着对大陆地质历史上消减板块汇聚造山带的深入研究, 造山带中分布的岩浆铜镍硫化物矿床开始被日益关注(韩宝福等, 2004; 李华芹等, 2006; Qin et al., 2011; Song et al., 2016), 特别是由于特提斯造山带中中国青海东昆仑夏日哈木超大型岩浆铜镍硫化物矿床的发现(李世金等, 2012; 王冠, 2014; 姜常义等, 2015; Li et al., 2015; 李文渊, 2015), 板块聚敛背景下岩浆铜镍硫化物矿床的成因被再次密切关注(Qin et al., 2011; Song et al., 2016; Liu et al., 2017)。由于造山带中形成岩浆铜镍硫化物矿床的镁铁—超镁铁质岩体多表现为Nd、Ta不相容元素亏损的岛弧地球化学信息, 岩浆铜镍硫化物矿床形成于大陆离散环境的传统认识受到了挑战。究竟是构造环境决定了岩浆铜镍钴硫化物矿床的形成, 还是地幔的部分熔融及形成岩浆的独特的演化共同构成了成矿的控制条件? 近年来的地球化学动力学研究表明, 俯冲消减岩石圈的脱水作用交代地幔楔对造山带中镁铁—超镁铁质岩体的形成是有贡献的, 这种俯冲消减可以很深, 深达软流圈而在垂向上远离岛弧的位置(Zheng et al., 2015, 2020)。很显然, 这种机制形成的镁铁—超镁铁质岩体在造山带中可以保存下来很多, 但其中何种类型的镁铁—超镁铁质侵入体能够造就岩浆铜镍钴硫化物矿床的形成, 特别是大规模的大型—超大型矿床的形成? 岩浆源区地幔的部分熔融和热动力源的问题又重新被提到岩浆铜镍钴硫化物矿床成因研

究的关键位置。并不是所有造山带中的镁铁—超镁铁质岩体都有利于形成岩浆铜镍钴硫化物矿床。已有的成矿事实研究表明, 尽管成矿的岩体很小, 却是经历了大规模地幔部分熔融形成的大的岩浆房的产物, 在侵入前深部岩浆房发生较为充分的硫化物液相与硅酸盐熔体之间的不混溶——熔离作用, 形成硫化物矿浆上侵—贯入, 才可能形成规模较大的矿床。

因此, 异常的高热动力源(地幔柱是最好的机制)造成软流圈地幔熔融, 遭受过消减物质脱水作用交代改造的软流圈由于降低了熔点而更有利于发生大规模的部分熔融, 这是造山带中俯冲消减物质的贡献。但关键是深部岩浆房中较为充分的侵入前熔离作用的发生, 只有侵入前硅酸盐熔体未结晶时的充分熔离作用, 才有可能使达到50%以上硫化物液相的矿浆上侵—贯入地壳浅部而大规模成矿, 依靠有限的浅部岩浆房硅酸盐熔体结晶过程中的就地熔离作用, 难以形成有规模的大型—超大型富矿床。总之, 不论是古老陆壳的大陆裂谷环境, 还是造山带中新生陆壳的伸展背景, 足够规模的岩浆量和深部岩浆房的充分熔离作用是成矿的关键。当然, 对于大陆裂谷环境和造山带中的伸展环境, 其岩浆源区性质和部分熔融的机制及深部熔离上侵—贯入演化的成矿过程存在重要差异也是造成岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿元素差异的重要原因。

岩浆铜镍硫化物矿床一般统称为“岩浆硫化物矿床(magmatic sulfide deposit)”, 以往在强调主要成矿元素的重要性时会统称为“岩浆铜镍硫化物矿床(magmatic Ni-Cu sulfide deposit)”, 并根据钴或铂族元素的富集程度, 有时称为“岩浆铜镍钴硫化物矿床(magmatic Ni-Cu-Co sulfide deposit)”或“岩浆铜—镍—铂族元素矿床(magmatic Ni-Cu-PGE deposit)”。当铂族元素主要不以硫化物形式赋存时, 不再称为硫化物矿床。由于目前钴金属应用的重要性, 文中不论钴元素含量的多寡, 统一将该类矿床称为“岩浆铜镍钴硫化物矿床(magmatic Ni-Cu-Co sulfide deposit)”, 以强调钴在这类矿床中的重要性。中国是岩浆铜镍钴硫化物矿床的产出大国, 岩浆铜镍钴硫化物矿床也是中国镍、钴和铂族元素的主要来源。随着中国经济的发展, 中国对镍、钴和铂族元素的需求日益增长, 目前镍矿

产品的对外依存度已超过 70%, 钴和铂族元素达 90% 以上, 加强国内岩浆铜镍钴硫化物矿产的勘查, 实现重大突破, 已迫在眉睫。同时, 亟待加强中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论的创新研究, 提高对这类矿床形成的深入理解和认识, 以有效指导矿产勘查活动, 助力找矿勘查实践。

1 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的分布与成矿特征及类型

1.1 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的时空分布

中国最早发现的岩浆铜镍钴硫化物矿床是四川会理的力马河矿床, 于 1957 年提交矿产资源储量报告、1958 年开发。该矿床也是中国第一个开发的岩浆铜镍钴硫化物矿床(汤中立等, 1989)。由于矿床规模小, 20 世纪末就已闭坑。中国真正的岩浆铜镍钴硫化物矿床的发现和勘探的历史以甘肃金川世界级超大型矿床的发现为标志, 该矿床的发现改变了中国“缺镍少铂”的局面。金川矿床发现于 1959 年, 中国工程院汤中立院士发现并主持了该矿床的勘探, 现已累计探明镍金属资源量近 6×10^6 t、铜 3.5×10^6 t、钴约 0.16×10^6 t、铂族元素达 2×10^6 t, 是名副其实的“聚宝盆”。金川已成为中国的镍钴基地。金川镍金属资源量现在位居世界第三位, 仅次于俄罗斯西伯利亚地盾的 Noril'sk 矿床和加拿大的 Sudbury 矿床, 但以单一岩体的金属资源量计算, 金川应该是世界上最大的岩浆铜镍钴硫化物矿床。因此, 自发现金川矿床并勘探开发后, 寻找金川型岩浆铜镍钴硫化物矿床就已成为世界上镍矿勘探者和研究者的梦想。

金川矿床位于华北陆块西端阿拉善地块南缘的龙首山隆起中, 由于含矿岩体虽小, 但含矿率高达 70% 而受人瞩目, 几乎整个岩体都矿化, 是“小岩体成大矿”的典范(汤中立和李文渊, 1995)。金川含矿岩体均为超镁铁岩, 基本由纯橄榄岩、二辉橄榄岩组成, 仅边部有少量橄榄辉石岩, 因此金川也是世界首例超镁铁岩为含矿岩体的岩浆铜镍钴硫化物矿床, 并因其成矿的独特性引发世界关注。发现金川矿床后, 此后的几十年中国开启了以基性—超基性岩为目标的寻找岩浆铜镍钴硫化物矿床的热潮, 先后在川西北扬子陆块西缘、东北吉林、黑龙江华北陆块北缘和吉黑造山带中发现冷水箐、朱

布、金宝山、赤柏松、红旗岭等中小型矿床。20 世纪 80 年代后新疆北部取得了重大找矿突破, 在东天山—北山、阿尔泰造山带中发现了黄山东、图拉尔根、喀拉通克等大中型矿床, 开启了在造山带中寻找岩浆铜镍钴硫化物矿床的历史。由于造山带中板块缝合带蛇绿岩基性—超基性岩与含铜镍硫化物基性—超基性岩带容易混淆, 20 世纪 80、90 年代曾对两种性质的岩石专门进行区分研究, 提出蛇绿岩基性—超基性岩为镁质系列, 镁铁比值 $m/f > 7$, 而成铜镍硫化物矿化的基性—超基性岩为铁质系列, 一般 $m/f = 2 \sim 6.5$ (王恒升等, 1978; 李文渊, 1996); 区分了两类岩石的构造性质, 前者是冷侵入, 为残存洋壳的镁铁—超镁铁质岩石, 而后者是造山后裂陷槽环境幔源岩浆上侵的结果(汤中立和李文渊, 1995; 李文渊, 1996, 2007)。但由于中国地质历史上的造山带均遭受过中生代印度次大陆与亚欧大陆碰撞的影响, 造山带多经历了陆内推覆叠置缩减, 即使热侵入的具有铜镍硫化物矿化的基性—超基性岩亦会产生构造位移而重新就位(李文渊, 2012, 2013)。

进入 21 世纪后, 学界加强了对岩浆铜镍钴硫化物矿床的研究, 开始更加关注该类矿床的成矿背景、岩浆源区、岩浆演化和铜镍钴硫化物富集机理的深入研究, 特别是锆石 U—Pb 同位素精细定年技术的广泛应用, 中国已发现的岩浆铜镍钴硫化物矿床含矿岩体的成岩年龄逐步集中于两个时代: 前寒武纪的新元古代, 如金川、冷水箐、赤柏松等, 一般多认为其形成于大陆裂谷环境; 晚古生代早二叠世—早中生代早三叠世, 分别为中亚造山系东天山—北山、阿尔泰和吉黑造山带中的黄山东、图拉尔根、坡一、喀拉通克、红旗一, 以及华南陆块西缘及三江造山带中的朱布、金宝山等(汤中立等, 1989, 2006; 李文渊, 1995, 1996), 形成环境比较复杂, 除形成于造山带中造山后的裂陷槽环境外, 认为与峨眉大火成岩省有关(张招崇等, 2006)。2011 年东昆仑夏日哈木超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床发现, 开启了中国第三轮岩浆铜镍钴硫化物矿床的找矿热潮。夏日哈木矿床是东昆仑特提斯造山带中发现的首例超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床, 在整个全球的特提斯造山系中亦是首例, 且形成时代独特, 形成于古生代末晚志留世和早古生代初早泥盆世之

交的中古生代,是世界上最发现的一期重要的岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿事件,被认为是古特提斯构造开裂的结果(李文渊, 2015, 2018; 李文渊等, 2021, 2022)。

总体来说,在中国已发现的三十余处岩浆铜镍钴硫化物矿床中,两例超大型矿床——世界级的金川矿床和镍金属资源量超过百万吨的夏日哈木矿床占据了我国镍、钴金属资源量的近 80%,其余均为镍金属资源量 $0.5 \times 10^6 \text{ t}$ 以下的大中小型矿床,新疆北山的坡一矿床初步估算资源量在百万吨以上,但其由于品位过低而难以利用。从空间分布上,中国岩浆铜镍钴硫化物矿床主要分布于西北地区的甘肃、青海和新疆,其次是西南地区的四川、云南和东北地区的吉林、黑龙江,陕西、河南、河北和广西有零星分布(汤中立等, 1989, 2006; 李文渊, 1995, 1996),如陕西的煎茶岭、河南的周庵、河北的铜

子、广西的大坡岭等;地质上,位于华北-阿拉善陆块的西南缘和北缘、塔里木-柴达木陆块的北缘、扬子陆块的西缘,可分为陆块和造山带两类(图 1)。陆块为华北-阿拉善陆块、塔里木-柴达木陆块和扬子陆块的边缘,造山带主要为中亚造山系的东天山-北山造山带、阿尔泰造山带、吉黑造山带、特提斯造山系的东昆仑古特提斯造山带等。

成岩成矿时代:主要为三个时期,分别为新元古代、晚志留世—早泥盆世和早二叠世—早三叠世。其中,新元古代以金川超大型矿床为代表。金川矿床曾经用全岩-橄榄石 Sm-Nd 等时线法测得年龄 $1508 \pm 31 \text{ Ma}$ (汤中立等, 1992),金属硫化物矿石获得 Re-Os 等时线年龄为 $1126 \pm 96 \text{ Ma}$ 和 $840 \pm 79 \text{ Ma}$ (杨胜洪等, 2007),但锆石、斜锆石 U-Pb 年龄为 $831 \sim 827 \text{ Ma}$ (Li et al., 2005b; Zhang et al., 2010),故普遍被认为是新元古代 Rodina 超大陆裂解超级地幔柱作

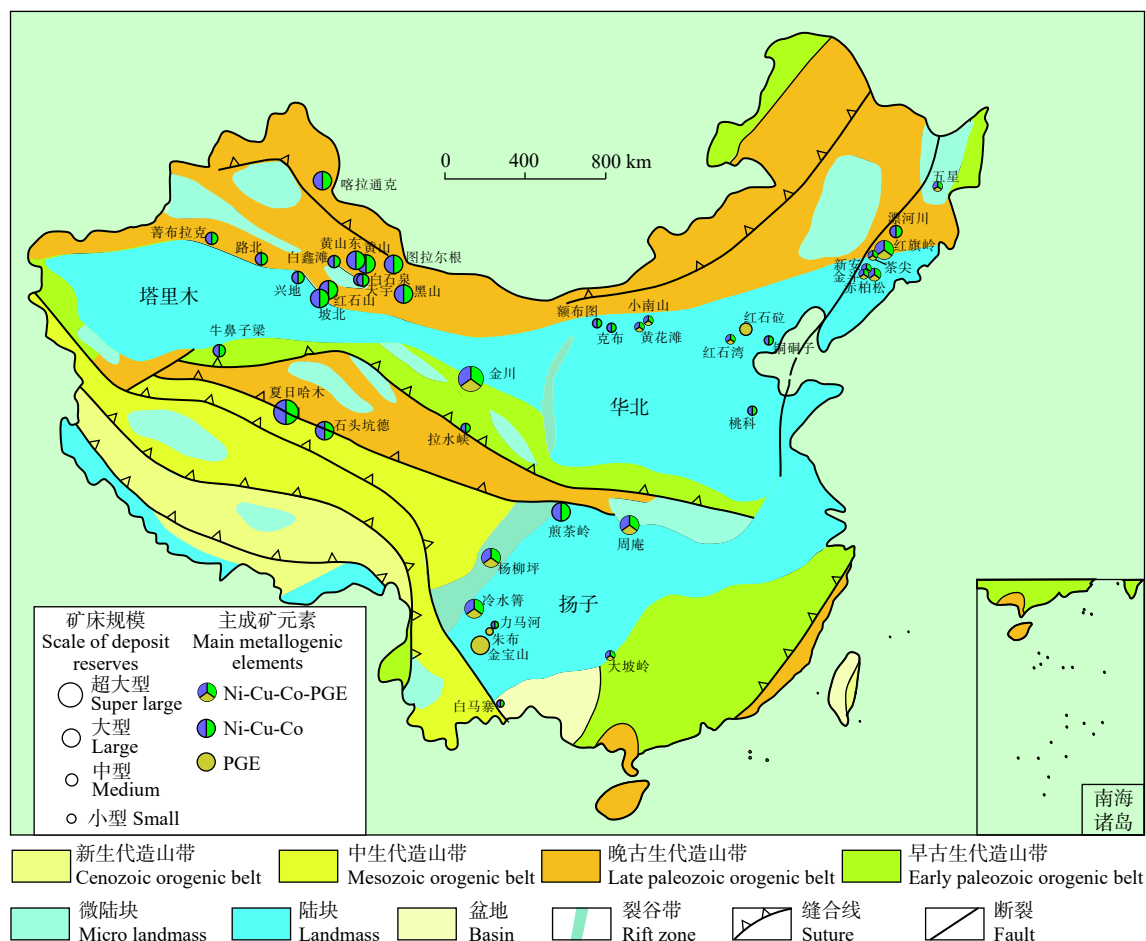


图 1 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床地质分布图 (据李文渊, 1996 修改; 中国地图轮廓据自然资源部 GS(2016)1552 号)

Fig. 1 Geological distribution of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in China(modified from Li, 1996; Map of China outline according to the Ministry of Natural Resources, PRC, GS (2016) 1552)

用的产物(Zhang et al., 2010; Duan et al., 2016); 晚志留世一早泥盆世则以夏日哈木超大型矿床为典型, 因发现较晚, 一开始即采用精确的测年技术, 在成岩成矿年龄上不存在分歧, 获得含矿辉长岩中锆石 U-Pb 年龄为 411~409 Ma(Li et al., 2015; Song et al., 2016), 被认为是特提斯造山系中原特提斯洋闭合碰撞造山后伸展或古特提斯构造裂解的产物(李文渊等, 2015, 2022; Song et al., 2016; 李文渊, 2018; Liu et al., 2018); 而早二叠世一早三叠世矿床主要有中亚造山系东天山-北山的黄山东、图拉尔根和阿尔泰的喀拉通克等(~ 280 Ma; 韩宝福等, 2004; 秦克章等, 2007; 姜常义等, 2012), 以及内蒙古的小南山(272.7 ± 2.9 Ma; 党智财, 2015)、吉黑造山带中的红旗岭(239.6 ± 2.6 Ma; 郝立波等, 2013)和扬子陆块西缘的力马河、金宝山等($263 \pm 3 \sim 260.6 \pm 3.5$ Ma; Zhou et al., 2008; 陶琰等, 2008), 相对比较复杂。中亚造山系东天山-北山的岩浆铜镍钴硫化物矿床可能是塔里木早二叠世地幔柱与古亚洲洋闭合碰撞造山后伸展作用共同的结果(Qin et al., 2011; 李文渊, 2012, 2018; Liu et al., 2016; 李文渊等, 2019a, 2020), 而向东到内蒙古和吉黑的已知矿床, 成岩成矿年龄逐渐变新, 甚至测得中新世代的年龄数据 156 ± 3 Ma(李立兴等, 2009)、 35.8 ± 40.3 Ma(李光辉等, 2010), 这可能与中亚造山带碰撞造山后伸展和中新世代太平洋板块俯冲消减的改造有关。扬子陆块西缘则是峨眉大火成岩省地幔柱作用的结果(Wang, 2006; Zhou et al., 2008)。可见, 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的形成与中国大地构造演化密切相关, 成矿事件与地质事件具有一致性。

同时, 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的成矿年龄除了新元古代、晚志留世一早泥盆世和早二叠世一早三叠世三个主成矿期外, 还获得一些其他成矿时代的数据, 如扬子陆块北缘的河南周庵矿床年龄为 641.5 ± 3.7 Ma(闫海卿等, 2010)和 636.5 ± 4.4 Ma(王梦玺等, 2012)。尽管镍金属资源量达 0.3×10^6 t 以上, 但由于其镍金属含量较低, 仅 0.3% 左右, 故并未引起广泛注意。

1.2 中国岩浆铜镍硫化物矿床的成矿背景

中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的成矿类型, 整体上较为单一, 多与小型的镁铁-超镁铁质侵入体有关。与全球岩浆铜镍钴硫化物矿床相比, 形成时代

相对年轻, 缺少与古元古代-太古代古老地盾裂解环境有关的科马提岩岩浆镍钴硫化物矿床和大型层状杂岩岩浆铂族金属矿床, 当然也没有类似于加拿大 Sudbury 的与古元古代陨石撞击有关的岩浆铜镍钴硫化物矿床。中国岩浆铜镍钴硫化物矿床一个显著的特点是: 除了金川超大型矿床等矿床外, 大部分规模较大的岩浆铜镍钴硫化物矿床均形成于造山带中, 与全球矿床产出特征相比, 这是一个独特的特征, 且形成时代比较晚, 主要在古生代, 个别到早中生代。因此, 中国的岩浆铜镍钴硫化物矿床类型, 按成矿背景大致可分为大陆裂谷环境和造山带伸展环境两大类(表 1)。

大陆裂谷环境成矿背景: 主要表现为大陆边缘裂谷环境和峨眉大火成岩省环境两类, 其成矿动力学均与地幔柱有关。金川超大型矿床的最大特点是含矿岩体为超镁铁质岩石, 没有镁铁质岩石, 或者说基本是超基性岩, 成矿元素可利用的已达 16 种, 以 Ni、Cu、Co、PGE 最为重要; 近年来发现的河南周庵大型矿床位于扬子陆块的北缘, 尽管其品位较低, 镍金属含量仅 0.3% 左右, 仍是扬子陆块北缘发现的首例岩浆铜镍硫化物矿床, 定年为前寒武纪末的产物(锆石 U-Pb, 641.5 ± 3.7 Ma; 闫海卿等, 2010), 具有进一步找矿的意义; 产于扬子地块南缘的广西大坡岭矿床以往被认为是中国唯一的科马提岩质岩浆铜镍钴硫化物矿床, 但由于未发现鬃刺结构, 故并未被广泛认同, 精细测年表明, 其是新元古代的产物(SHRIMP 锆石 U-Pb, 828 ± 7 Ma; 葛文春等, 2001), 与加拿大地盾、西澳地盾上产出的科马提岩流相比, 过于年轻, 科马提岩应是 25 亿年古元古代以前的一种特殊的超镁铁质岩浆喷发的产物, 中国目前尚未发现这种类型的超镁铁质喷出岩, 亦无相应矿床的产出。

金川、大坡岭、周庵和塔里木陆块北缘的新疆兴地(锆石 U-Pb, 760 ± 6 Ma; Zhang et al., 2011)等矿床, 均可视作 Rodinia 超大陆裂解的产物, 但幔源、岩浆演化过程和成矿动力的差异, 使其在矿床规模和成矿元素富集程度上有重要的差距。赤柏松矿床过去也被认为是元古代大陆裂谷环境的产物, 精细定年(SHRIMP 锆石 U-Pb, 134 ± 7 Ma; 裴福萍等, 2005)显示为中生代中晚期的产物, 很可能是中生代古太平洋板块向西俯冲, 东亚大陆边部破坏而活

表 1 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿特征及类型一览表

Table 1 Schedule of mineralization characteristics and types of magmatic Ni–Cu–Co sulfide deposits in China

成矿背景	典型矿床	主要岩石类型	成矿元素	矿床规模	测年方法和成矿时代	文献来源	
大陆裂谷环境	金川	二辉橄榄岩、纯橄榄岩	Ni、Cu、Co、PGE	超大型	SHRIMP锆石U–Pb, 827 ± 8 Ma	Li et al., 2005b	
	兴地	辉长岩、二辉岩、二辉橄榄岩	Ni、Cu	小型	锆石U–Pb, 760 ± 6 Ma	Zhang et al., 2011	
	大坡岭	变辉橄岩、变辉石岩、辉长辉绿岩	Ni、Cu、Co、PGE	小型	SHRIMP锆石U–Pb, 828 ± 7 Ma	葛文春等, 2001	
	周庵	二辉橄榄岩、橄辉辉石岩	Ni、Cu、PGE	大型	锆石U–Pb, 641.5 ± 3.7 Ma	闫海卿等, 2010	
	桃科	变橄榄辉长苏长岩、变辉长苏长岩	Ni、Cu、PGE	小型	锆石U–Pb, 2715 ± 16 Ma	孙涛等, 2016	
	铜铜子	蚀变辉长-辉绿岩	Ni、Cu	小型	元古代?		
	赤柏松	辉长辉绿岩、二辉橄榄岩	Ni、Cu、Co、PGE	小型	SHRIMP锆石U–Pb, 134 ± 7 Ma	裴福萍等, 2005	
	力马河	单辉橄榄岩、辉长-闪长岩	Ni、Cu	小型	SHRIMP锆石U–Pb, 263 ± 3 Ma	Zhou et al., 2008	
	白马寨	橄辉岩、橄辉岩、辉石岩、辉长岩	Ni、Cu、Co、PGE	小型	SHRIMP锆石U–Pb, 258.5 ± 3.5 Ma	Wang, 2006	
	金宝山	蚀变单辉橄榄岩、辉长辉绿岩	PGE、Ni、Cu、Co	大型	SHRIMP锆石U–Pb, 260.6 ± 3.5 Ma	Tao et al., 2015	
造山带伸展环境	杨柳坪	二辉橄榄岩、辉石岩、辉长岩	PGE、Ni、Cu	大型	晚二叠纪?		
	特提斯造山带	夏日哈木	二辉岩、辉长岩、橄辉岩	Ni、Cu、Co	超大型	锆石U–Pb, 411.6 ± 2.4 Ma	Li et al., 2015
	夏	拉水峡	蚀变橄辉岩	Ni、Cu、Co、PGE	小型	?	
		煎茶岭	蛇纹岩、滑镁岩、菱镁岩	Ni、Co	大型	硫化物Re–Os等时线, 878 ± 27 Ma	王瑞廷等, 2003
		黄山东	角闪橄辉辉长岩、辉长橄辉岩	Ni、Cu、Co、PGE	大型	SHRIMP锆石U–Pb, 274 ± 3 Ma	韩宝福等, 2004
	图	拉尔根	角闪橄辉岩、辉石岩、辉长岩	Ni、Cu、Co、PGE	大型	SHRIMP锆石U–Pb, 300.5 ± 3.2 Ma	三金柱等, 2010
		坡一	角闪辉长岩、橄辉辉石岩	Ni、Cu	大型	TIMS锆石U–Pb, 274 ± 4 Ma	秦克章等, 2007
		菁布拉克	闪长岩、橄辉辉长岩、橄辉岩	Ni、Cu	小型	SHRIMP锆石U–Pb, 434.4 ± 6.2 Ma	张作衡等, 2007
	中	黑山	斜角闪橄辉岩、辉长岩	Ni、Cu	大型	SHRIMP锆石U–Pb, 356.4 ± 0.6 Ma	Xie et al., 2012
		小南山	蚀变辉长岩	Ni、Cu、Co、PGE	小型	锆石U–Pb, 272.7 ± 2.9 Ma	党智财, 2015
		喀拉通克型	方辉橄辉岩、辉长苏长岩	Ni、Cu、PGE	大型	SHRIMP锆石U–Pb, 287 ± 5 Ma	韩宝福等, 2004
	红	旗岭型	斜方辉石岩、橄辉岩、辉长岩	Ni、Cu、Co	大型	SHRIMP锆石U–Pb, 239.6 ± 2.6 Ma	郝立波等, 2013
		五星	辉长岩、辉石岩、橄辉辉石岩	Ni、Cu、Co、PGE	小型	SHRIMP锆石U–Pb, 37.79 ± 0.76 Ma	李光辉等, 2010

化的产物。位于华北陆块东部的桃科、铜铜子小型矿床,过去推测为中国比较古老的岩浆铜镍硫化物矿床(李文渊, 1996),由于矿床规模过小,特别是桃科矿床早已闭坑,并未引起学界的关注,孙涛和王登红(2019)对桃科开展锆石U–Pb精细测年,获得了2715 ± 16 Ma的数据,证实为新太古代的产物。峨眉晚二叠世大火成岩省是中国第一个被确认的大火成岩省(Xu et al., 2001),现在研究已证实力马河、白马寨、金宝山和杨柳坪等矿床,均为大火成岩省事件的产物(Wang, 2006; Zhou et al., 2008),但岩浆铜镍钴硫化物和铂族元素成矿规模都不大,以攀枝花为代表的大规模钒钛磁铁矿床是峨眉大火成岩省的成矿特色。

造山带伸展环境成矿背景:情形比较复杂,可能是一种新生陆壳的裂陷槽环境(李文渊, 1996; 肖序常等, 2010),可进一步划分中亚造山带和特提斯造山带两种产出背景。中亚造山带中岩浆铜镍钴

硫化物矿床的分布,由西而东,可大致分为西部、中部和东部三个分布区。西部以新疆北部和甘肃西部的东天山–北山和阿尔泰矿带为主,表现为与塔里木早二叠世大火成岩省形成时代上的密切相关性,主要以~280 Ma的成岩时代为典型特征(毛景文等, 2002);中部内蒙古一带的成岩年龄逐渐年轻,到东部吉黑构造带,精细测年获得的成岩成矿年龄与西部相比有很大差异,表现为晚三叠世的特点,特别是五星小型矿床还获得了37.79 ± 0.76 Ma的数据(李光辉等, 2010)。很显然,中亚造山带中的东、西部的岩浆铜镍钴硫化物矿床有重大差异,西部明显与塔里木早二叠世大火成岩省有关,地幔柱在源区部分熔融热动力和成矿物质上有重要作用,当然中亚造山带俯冲消减的洋壳物质对地幔源区的改造是显而易见的,这构成了不同矿床之间的重要差异。而东部矿床的形成除了消减洋壳物质对地幔源区的改造外,太平洋板块向西俯冲的改造

可能是重要的成矿背景条件,因而造成了东部矿床成矿时代相对年轻的差异和后期热液改造发育的特点。

特提斯造山带中的岩浆铜镍钴硫化物矿床的重要性是伴随着夏日哈木超大型矿床的发现而被日益重视的。现有研究表明,夏日哈木矿床可能是原特提斯闭合造山后,古特提斯在新生陆壳基础上拉张的产物,原特提斯消减的洋壳物质对软流圈地幔物质的改造有重要贡献(Liu et al., 2018; 李文渊等, 2021, 2022)。需要特别提出的是,中亚造山带中的西天山伊犁菁布拉克和甘肃北山黑山矿床,分别获得了 434.4 ± 6.2 Ma 和 356.4 ± 0.6 Ma 的测年数据(张作衡等, 2007; Xie et al., 2012),与其他中亚造山带中早二叠世的岩浆铜镍钴硫化物矿床有重要不同,这可能也反映了古亚洲洋与特提斯洋一样,具有分阶段演化的特点。原特提斯汇聚时,古亚洲洋也有过汇聚,古特提斯裂解时,局部汇聚的中亚造山带又发生过再次裂解伸展。煎茶岭矿床是中国岩浆硫化物矿床中一例成矿独特的矿床,形成于秦岭造山带的勉略宁地块中,超镁铁岩原岩已全部蚀变为蛇纹岩、滑镁岩和菱镁岩等岩石,现在是作为后期构造热液金矿在开采,但确实存在以镍、钴金属硫化物富集为特点的岩浆硫化物矿床特征,缺乏铜。获得的硫化物 Re-Os 等时线年龄为 878 ± 27 Ma(王瑞廷等, 2003),蚀变的超镁铁岩表现为镁质系列的特点,故有前寒武纪蛇绿岩成矿的认识(汤中立等, 2006),但很可能是原特提斯洋壳古老陆壳残留地幔岩早期富集的硫化物富集,后期被挟裹在蛇绿岩中而成,值得进一步研究。

2 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的成因研究

2.1 大岩浆-深部熔离-贯入成矿——“小岩体成大矿”

岩浆铜镍钴硫化物矿床为幔源岩浆侵入前、侵入中和侵入后发生硫化物液相与硅酸盐熔体不混溶(熔离)而成矿的认识由来已久(Craig, 1979)。但幔源岩浆侵入前的不混溶(熔离)作用研究并不深入,亦缺乏可资说明的典型实例。金川超大型矿床是典型的“小岩体成大矿”实例,如此多的金属硫化物富集成矿不可能是现有岩体就地熔离的结果。汤中立和李文渊(1995)系统总结了金川深部大规模

岩浆熔离作用形成的矿浆上侵而贯入成矿的思想认识,经过近 20 余年的深入研究,已在国内外产生了广泛的影响(Lightfoot and Naldrett, 1999; Li and Ripley, 2011),并在找矿实践中不断被验证(李文渊, 2006b, 2015; 三金柱等, 2010; 李世金等, 2012; 李文渊等, 2012a, 2012b, 2019a)。中国岩浆铜镍钴硫化物矿床“深部熔离-贯入成矿”导致“小岩体成大矿”的成因认识,是以汤中立院士为代表的金川超大型矿床勘查研究者在长期的勘探研究实践中孕育并不断完善而成型的创新性学术思想。

从勘探之初,从金川含矿岩体紧靠龙首山北缘 F_1 深大断裂的事实出发,提出金川含镍超镁铁质岩体是沿着 F_1 断裂上侵而成矿的认识(甘肃地矿局第六地质队, 1984)。但经过可控源大地电磁测深(MT)发现,金川含矿岩体所在的龙首山陆块边缘隆起,是沿着 F_1 这个深大断裂在约 10 km 深度推覆上升的岩片,金川含矿岩浆房最终就位于至少 10 km 地壳深处。 F_1 断裂并非导岩构造,也没有原想的那么历史久远,大约是中生代以来自南而北的陆内构造推覆体的逆冲剪切推覆面,新生代转化为至今仍活动的张性断裂(汤中立和李文渊, 1995; 李文渊, 1995, 1996)。其重要贡献是将 10 km 以深的金川含矿超镁铁质岩体推覆上升经剥蚀而裸露于地表,并使深部原来呈水平状的“岩床”推覆至浅部呈斜立的“岩墙”而出露(李文渊, 1995, 1996)。因此,今天的金川含矿岩体的空间分布形态并非金川成矿的最终岩浆房的空间分布位置和形态,金川最终成矿岩浆房是水平的(图 2),这为我们今天找寻金川矿床深部新的岩体和矿体提供了一种全新思考(李文渊等, 2020)。

现代精细测试方法为我们深入理解“深部熔离-贯入成矿”作用提供了重要支持。新元古代南华纪(831~827 Ma),伴随超级地幔柱的作用, Rodina 超大陆开始裂解,金川含矿岩体正好处于阿拉善地块、塔里木陆块、扬子陆块和西澳陆块裂解的地幔柱上升的位置(Zhang et al., 2011; Pirajno, 2013),金川含矿超镁铁质岩石 Th/Yb-Nb/Yb 图解显示,位于 E-MORB 与 OIB 之间(图 3),与峨眉大火成岩省的苦橄岩的范围相重合,表明金川成矿岩浆具有地幔柱岩浆参与的特征,而偏向地壳曲线的趋势是成矿岩浆上侵地壳过程中遭受地壳物质混染的特点(Tang et al., 2013)。

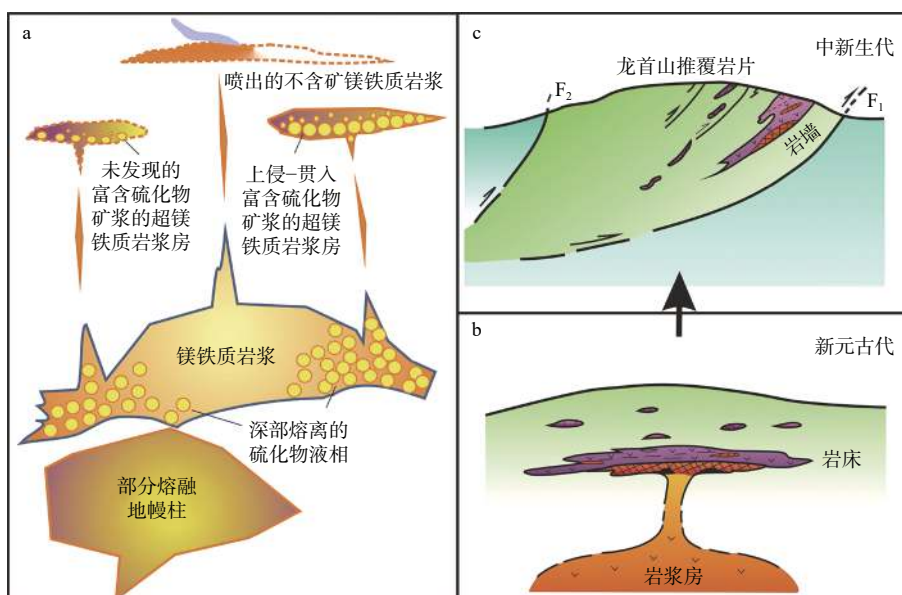


图2 金川超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床深部熔离-贯入成矿及就位模式图(据李文渊, 1996, 2007 修改)

Fig. 2 Deep immiscibility-injection mineralization and displacement mode diagram of the Jinchuan super-large magma copper-nickel-cobalt sulfide deposit(modified from Li, 1996, 2007)

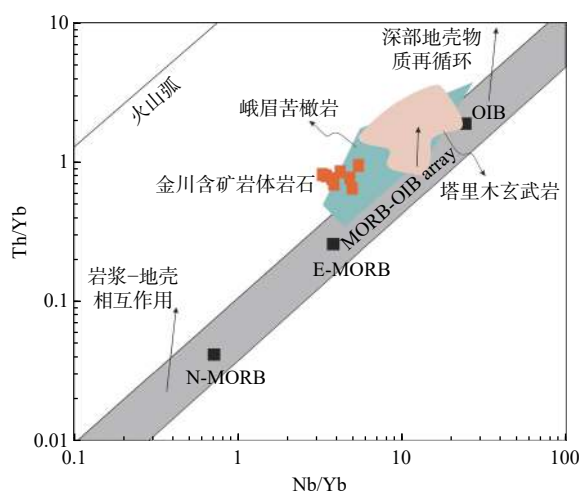


图3 金川含矿超镁铁岩 Nb/Yb-Th/Yb 图解(据 Tang et al., 2013 修改)

Fig. 3 Nb/Yb-Th/Yb diagram of the Jinchuan ore-bearing ultramafic intrusions (modified from Tang et al., 2013)

金川岩体平均含硫高达 6%, 硫溶解平衡计算, 现有金川岩体的岩浆只占岩浆总量的 3% 左右。因此, 尽管金川现有成矿岩体很小, 但原始岩浆规模是很大的, “R” 因子计算(硅酸盐熔浆与硫化物的质量比)为 150~1000, 亦支持这一结论(Duan et al., 2016)。要产生较大规模的原始岩浆, 上地幔部分熔融的程度很关键, 金川原始岩浆大致为上地幔 20%~30% 部分熔融的产物, 使得上地幔中的硫和镍、铜、钴、铂族元素进入岩浆中。同时, 金川铬尖

晶石具有相对较高的 Fe^{+3} , 反映了金川岩浆较高氧逸度的特点。氧逸度高, 有利于耗尽上地幔中的硫化物, 使亲硫元素带入岩浆, 为熔离形成岩浆硫化物矿床提供有利条件。

金川矿床勘探的顺序, 由西北而东南此次为: III 矿区、I 矿区、II 矿区和 IV 矿区(图 4)。I 矿区和 II 矿区裸露, 两端的 III 矿区和 IV 矿区隐伏在中新生界之下。金川矿床的 24 号、1 号和 2 号三个主矿体分布于 I 矿区和 II 矿区, 占金川矿床探明金属硫化物资源量的近 90%。其中, 24 号矿体分布于 I 矿区, 1 号矿体分布于 II 矿区的西段, 整体上 24 号矿体和 1 号矿体所在的含矿岩体形态呈板状, 矿体亦呈板状或长透镜状产于岩体下侧或下边部, 以海绵陨铁状矿石为主, 富含铂族元素; 大致以 II 矿区 F_{17} 断层为西界(图 4), 东段岩体表现为上部宽大下部突然收缩的漏斗状, 2 号矿体呈透镜状产于下侧, 具有较多块状矿石, 但缺少铂族元素富集。推测 24 号矿体、1 号矿体所在的板状岩体与 2 号矿体所在的漏斗状岩体, 可能分别代表金川含矿超镁铁质岩体不同期次上侵-贯入的富含矿浆的最终岩浆房, 就位于一起而表现为一个统一的含矿岩体。III 矿区和 IV 矿区隐伏的岩体及矿体, 可能分别反映了西段板状岩体和东段漏斗状岩体, 向西和向东的延伸或分支, 它们是深边部进一步找矿的重点位置。

由于铂族元素极高的分配系数($D^{\text{Sul/Sil}}=10^4\sim$

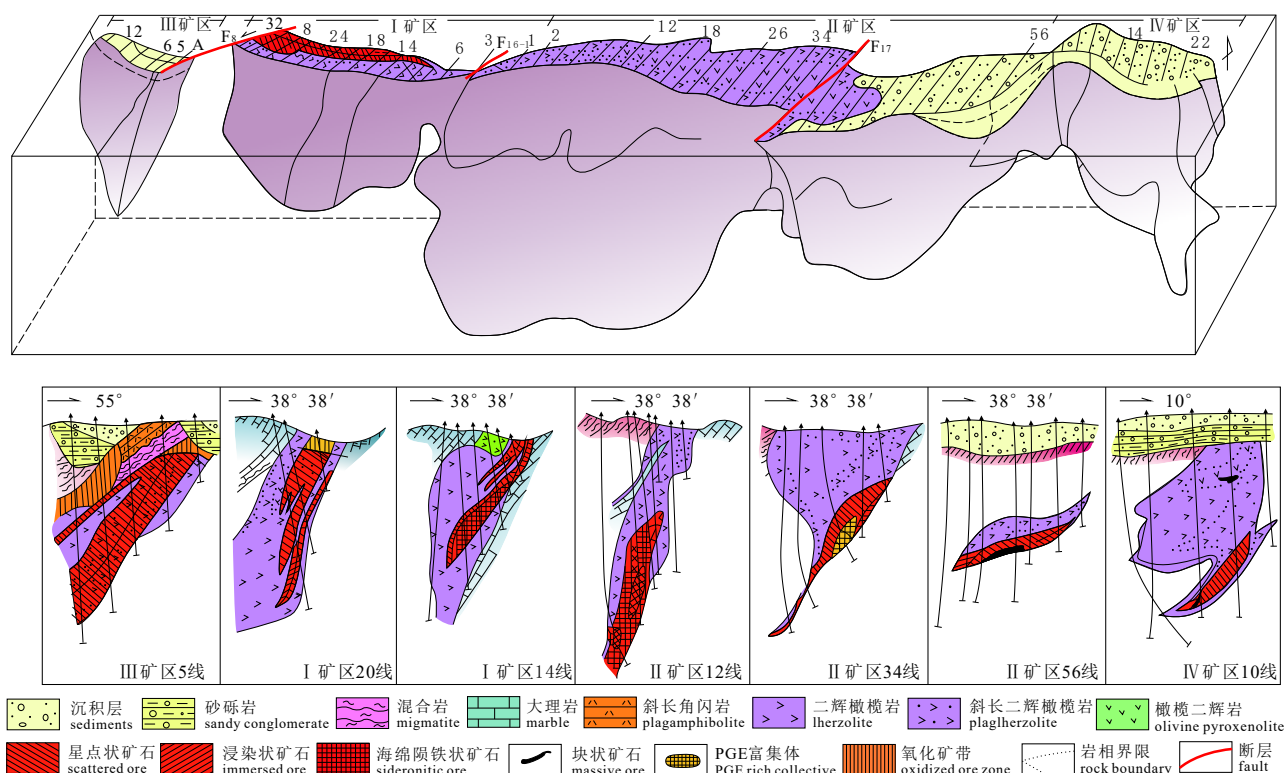


图4 金川含矿超镁铁岩体立体形态及主要横断面示意图(据李文渊, 1996 修改)

Fig. 4 Schematic diagram of the stereoscopic morphology and main cross sections of the Jinchuan ore-bearing ultramafic rock body(modified from Li, 1996)

10^5), 深部熔离作用使硅酸盐熔浆中的铂族元素快速进入硫化物液相之中, 使经过初步熔离的硅酸盐熔体的铂族元素亏损, 再进一步发生熔离时, 熔离出的硫化物液相中铂族元素量急剧减少。同源的东、西段富含矿浆的岩浆房, 或许就是不同期次深部熔离作用的熔浆分别上侵-贯入的结果。西段岩浆房可能代表了较早深部熔离作用形成的富含铂族元素矿浆的岩浆房, 而东部岩浆房则是相对较晚熔离作用形成的亏损铂族元素矿浆的岩浆房。经历不同演化过程的岩浆, 之间发生混合作用有助于硫的过饱和而再次发生硫化物液相-硅酸盐熔体的熔离作用(图5), 并在上升进入地壳过程中, 地壳物质 FeO 的加入和地壳硫的萃取, 加剧熔离作用的发生。金川 $\Delta^{33}\text{S} = -0.01\% \sim 2.67\%$, 提供了地壳硫加入的证据。

金川超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床是世界上“小岩体成大矿”的典型实例, 超级地幔柱作用导致软流圈地幔较高级度的部分熔融产生大规模岩浆是“成大矿”的前提, 而深部熔离作用形成富含金属硫化物的矿浆是基础, 地壳物质的加入促使岩浆硫过饱和是重要条件, 或许不同演化路径的岩浆在上侵中发生岩浆混合作用也是导致金属硫化物液相

进一步熔离的重要原因。

伸展环境中形成的较小体积但较高矿化度的矿浆要上侵-贯入浅部地壳, 需要挤压环境的转变来实现, 因此富含铜镍钴硫化物矿浆的最终岩浆房的就位, 并非是张性断裂的环境, 而是挤压的通道, 并使其在合适的压力平衡条件下, 呈近水平的“岩床”就位于陆壳深部的合适环境, 并在漫长的结晶分异过程中继续发生就地熔离成矿作用和岩浆期后热液叠加富集成矿作用。最终, 结晶而成的含矿“岩床”在中新生代陆内造山运动过程中, 随古老的地壳岩石推覆经剥蚀而裸露于地表, 并呈“岩墙”状产出。这是金川超大型矿床形成的地质历史, 中国大部分有工业利用价值的岩浆铜镍钴硫化物矿床其实都有类似的地质形成过程, 只是形成时代、构造背景和岩浆源区及部分熔融的地球动力学条件不同罢了。

2.2 特提斯构造转换——古特提斯裂解是特提斯型岩浆铜镍钴硫化物矿床形成的地质背景条件
所谓特提斯型岩浆铜镍钴硫化物矿床, 是指形成于特提斯造山带中的岩浆铜镍钴硫化物矿床, 并以夏日哈木超大型矿床为典型代表。夏日哈木超

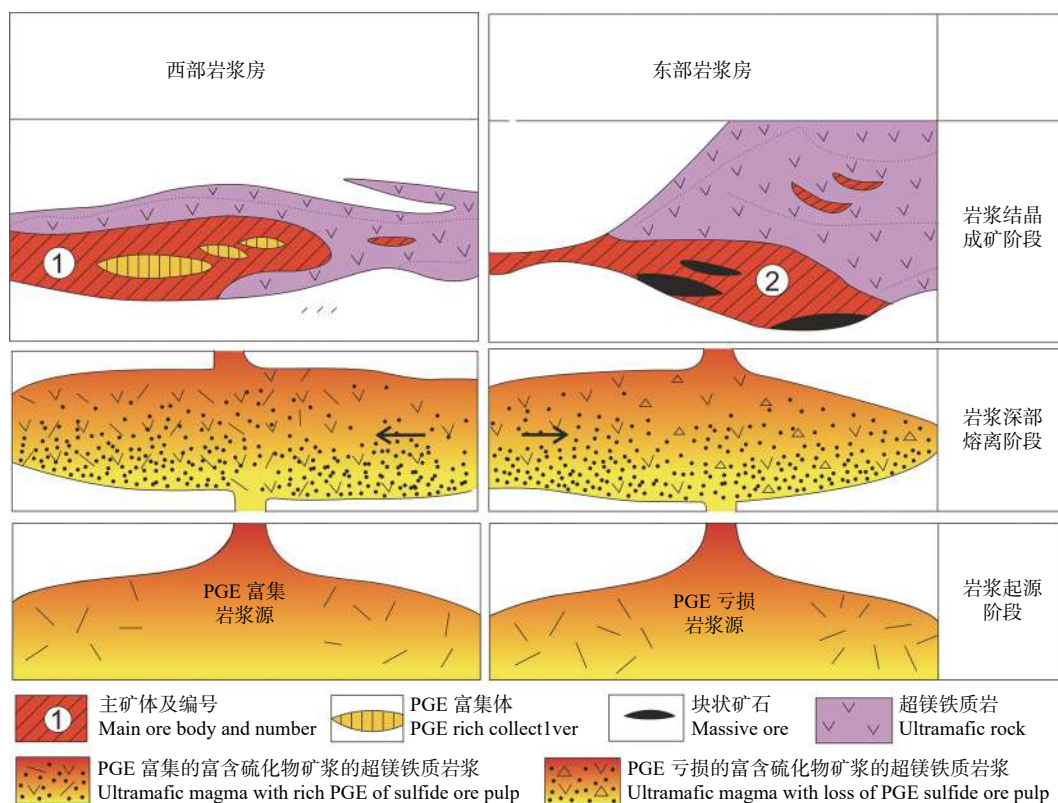


图 5 金川矿床东、西部岩浆房成矿模式图解 (据李文渊, 1996, 2007 修改)

Fig. 5 Mineralization pattern diagram of the east section and west section of the magma chambers of the Jinchuan deposit(modified from Li, 1996, 2007)

大型矿床的形成代表了消减聚敛环境中独特的成岩成矿条件。现在研究已经比较清楚, 首先夏日哈木的铜镍钴硫化物矿石总量远低于金川超大型矿床, 但其“ R ”因子(硅酸盐岩浆与硫化物的质量比)范围(100~1000)并不比金川“ R ”因子范围(150~1000)低多少, 且 MgO 含量为 9.79%~12.48%(Li et al., 2015; Song et al., 2016; 张志炳, 2016; Liu et al., 2019; 李文渊等, 2022), 也与金川相当(11.79%~12.9%), 说明发生了较高级度的部分熔融(夏日哈木 15%~25%, 金川 20%~30%), 但夏日哈木的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与金川相比较低, 而 ϵ_{Nd} 高于金川(图 6), 说明夏日哈木的母岩浆没有金川富集。

夏日哈木含矿岩体有较高级度的深部熔离作用发生, 因为铂族元素较铜有极高的硫化物液相与硅酸盐熔体的分配系数 $D^{\text{Sul/Sil}}=10^4\sim10^5$ (前者为 $10^4\sim10^5$, 后者为 10^3), Cu/Pd 比值的高低, 可间接反映深部熔离作用的程度, 夏日哈木岩石的 Cu/Pd 比值为 $0.02\times10^5\sim11.68\times10^5$ (平均为 18.2×10^4), 甚至高于金川岩石的 Cu/Pd 比值 $0.31\times10^5\sim3.20\times10^5$ (平均为 17.3×10^4)(Peach et al., 1990; Bezmen et al., 1994; Fleet

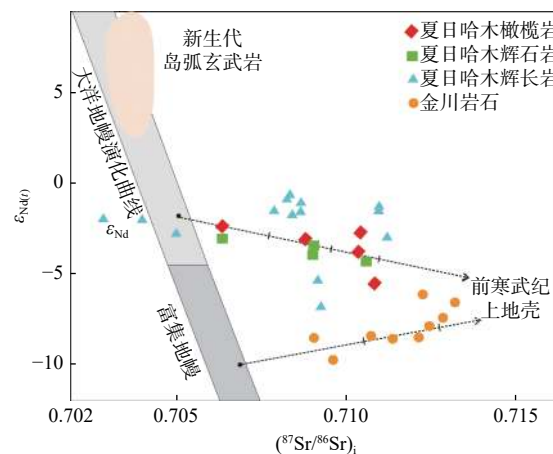


图 6 夏日哈木含矿镁铁-超镁铁岩 Sr-Nd 同位素对比图解 (据 Zhang et al., 2021 修改)

Fig. 6 Comparison of the Sr-Nd isotope of the Xiarihamu ore-bearing mafic-ultramafic intrusions(modified from Zhang et al., 2021)

et al., 1996)。此外, 夏日哈木矿床经历了较为漫长而稳定的充分结晶分异过程, 橄榄石中的 CaO 含量具有重要的指示意义, 当橄榄石结晶冷却速度快、压力低时, 其 CaO 含量高; 反之亦然, 金川矿床的橄榄石 CaO 含量为 0~2.07%, 且普遍 $>0.02\%$, 而夏日

哈木基本 $<0.02\%$ (Larsen and Pedersen, 2000; 韩一筱, 2021)。可见,也只有这种特殊的条件,才可使夏日哈木形成仅次于金川的超大型矿床。而这种成矿环境的形成是地幔柱作用的结果,夏日哈木超大型矿床是原特提斯洋闭合造山后,由于地幔柱作用古特提斯裂解背景的产物,并非真正岛弧环境的产物(李文渊等, 2021, 2022)。俯冲消减的洋壳在不同的俯冲深度产生不同的液相组成,当洋壳俯冲隧道板片-地幔楔软流圈交换反应时,会引起地幔楔软流圈橄榄岩水化,水化橄榄岩由于温度低并不发生部分熔融,只有当减压发生或新的热源(地幔柱)作用时,才可能使水化的橄榄岩发生部分熔融形成镁铁质熔体,从而构成造山带中镁铁-超镁铁质侵入岩的源区(Zheng et al., 2020)。很显然,俯冲消减的洋壳板片的脱水作用,根据俯冲的深度,可导致板块聚敛带 200 km 深度的岛弧环境到 400 km 深度远离俯冲位置的板内洋岛,形成镁铁-超镁铁质侵入岩的源区(Zheng et al., 2020)。当板块碰撞闭合后,这些消减的洋壳板片还可继续作用,断离进入软流圈水化地幔岩,进而形成碰撞造山后伸展环境镁铁-超镁铁质侵入岩的源区。可见,造山带中侵入的镁铁-超镁铁质侵入岩可以从岛弧、洋岛到造山后伸展环境形成,它们的源区深度和性质不同,但均具有岛弧地球化学的特点。这反映了消减聚敛环境与大陆拉张环境两种不同类型岩浆铜镍钴硫化物矿床赋矿岩体的形成环境的不同。消减聚敛环境的造山带中形成大规模的岩浆铜镍钴硫化物矿床的成矿约束条件可能更苛刻一些,很难有超大型规

模的矿床形成。若有形成必将具备相当严苛的条件。因为聚敛环境的地幔楔软流圈,水化作用温度比较低,尽管部分熔融温度也降低了,但部分熔融的程度不高,形成的岩浆量有限,加之已改造的上地幔,很难有足够量的硫化物进入岩浆。

昆仑造山带中早、晚古生代交替之间的镁铁-超镁铁岩分布时间范围较广(443~378 Ma),至少存在两期不同构造背景的镁铁-超镁铁岩:一期在 420 Ma 之前,是原特提斯碰撞造山伸展环境的产物(图 7a、7b),没有矿化或没有工业价值的矿床;另一期是 420 Ma 之后古特提斯新生陆壳再次裂解的产物(图 7c、7d)。岛弧成因的镁铁-超镁铁岩很难形成有价值的岩浆铜镍钴硫化物矿床。碰撞造山后伸展环境,由于其温度和部分熔融形成的有限的岩浆熔融体量,也难以产生大规模的硫化物熔离作用,也就难以形成大规模的岩浆铜镍钴硫化物工业矿床。小矿与大矿的成因机制是不相同的。只有造山带中已形成新的陆壳,板片改造的软流圈由于地幔柱巨大的地球热动力作用,才能发生大规模部分熔融,产生大规模岩浆,才有可能形成较大规模的岩浆铜镍钴硫化物矿床(李文渊等, 2021)。

因此,造山带中的岩浆铜镍钴硫化物矿床并不形成于俯冲消减或碰撞造山阶段,而是产于造山后的伸展阶段,甚至是新生陆壳由于地幔柱作用而裂解的环境,所以是在造山带中但不是造山期形成。

2.3 板块构造+地幔柱双重体制造就了中亚型岩浆铜镍钴硫化物矿床的岩浆源区特点

所谓中亚型岩浆铜镍钴硫化物矿床,就是指形

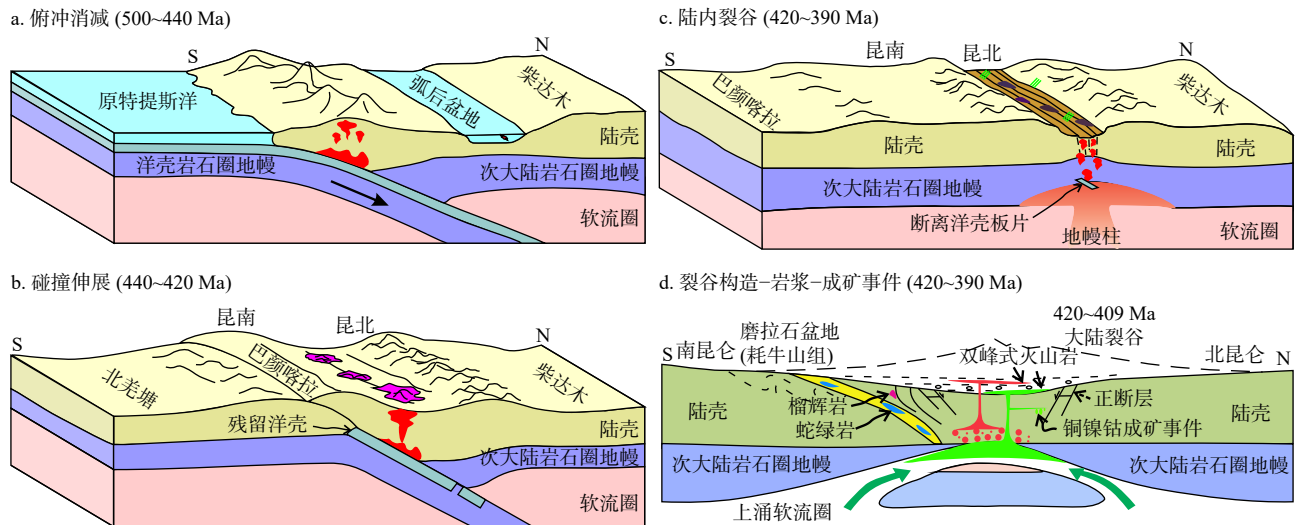


图 7 东昆仑古特提斯裂谷构造-岩浆-成矿事件示意图(据李文渊等, 2021 修改)

Fig. 7 Schematic diagram of the rift formation-magma-metallogenic event of Paleo-Tethys in East Kunlun (modified from Li et al., 2021)

成于中亚造山带东天山-北山及阿尔泰早二叠世(~ 280 Ma)的众多岩浆铜镍钴硫化物矿床。其中,东天山-北山与镁铁-超镁铁岩有关的岩浆铜镍钴硫化物矿床分布广泛,是中国该类型矿床重要的分布区带(李文渊等, 2019a),具体分布于三个构造单元:一是东天山觉罗塔格沟弧盆构造带,产有黄山、黄山东、香山、葫芦、图拉尔根、白鑫滩、路北等矿床;二是中天山地块北缘,有天宇、白石泉矿床;三是北山裂谷,有坡一、笔架山、罗东、漩涡岭等矿床(图8)。

这些矿床除图拉尔根(300.5 ± 3.2 Ma)和甘肃北山地区的黑山矿床(356.4 ± 0.6 Ma)外,主要形成于 ~ 280 Ma。很显然这些矿床的形成与现在所在构造单元的构造建造所代表的环境没有关系,这些构造建造主要是石炭纪之前的产物。事实上,中亚造山带所反映的古亚洲洋构造演化认识至今也存在很大分歧,争论的焦点是古亚洲洋闭合的时限问题(Xiao et al., 2004, 2020; Xia et al., 2004, 2013)。不过现在已经越来越多的人倾向认为,古亚洲洋与原特提斯洋是相关的,它们均是Rodina超大陆裂解后劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间的大洋(Yakubchuk, 2004, 2017; Frish et al., 2011; 李文渊, 2018),只是位置不同而已,华夏古陆群将它南面的原特提斯洋和北面的古亚洲洋分开,两者或许是主次关系,原特提斯洋主,古亚洲洋次。现在已经比较清楚,特提斯洋的演化过程具有三分的特点,中新生的新特提斯洋

之前有晚古生代一早中生代的古特提斯洋,古特提斯洋之前有早古生代的原特提斯洋(李文渊, 2018; Zhao et al., 2018; 吴福元等, 2020; 李文渊等, 2021)。古亚洲洋是否亦存在中间闭合,或者说是有限闭合,而后又重新扩张直至三叠纪闭合成陆的演化历程,基本与原特提斯洋、古特提斯洋的演化一致,是一个颇值得探讨的问题。目前,学术界还缺乏这方面的研究。

但中亚造山带存在泥盆纪的陆内建造,是比较清楚的,不仅在境内有大量的报道,苏联在中亚的地质研究,也很清楚地表达了早古生代和晚古生代两套蛇绿岩的存在(Yakubchuk, 2004, 2017; 李文渊等, 2019a, 2019b)。只是这种闭合很可能是有限的,有些地区并未完全闭合,甚至是一种“闭”而不“合”和此“闭”它“开”的特点。新的裂解事件是跨时的。因此,东天山-北山早二叠世的岩浆铜镍钴硫化物矿床的源区地质背景,考虑与中亚造山带构造演化上的整体协调性,很可能处于一种碰撞造山后伸展与塔里木地幔柱共同作用的软流圈源区地质背景(李文渊, 2018)。

尤敏鑫(2022)在前人研究基础上,又专门研究了东天山沙垅以西新发现的白鑫滩、路北两个矿床的成矿作用及岩浆源区地球化学特征,再次证明了东天山-北山岩浆铜镍钴硫化物矿床是板块体制+地幔柱体制双重作用的结果。微量元素地球化学特征表明,东天山-北山矿床源区与特提斯造山

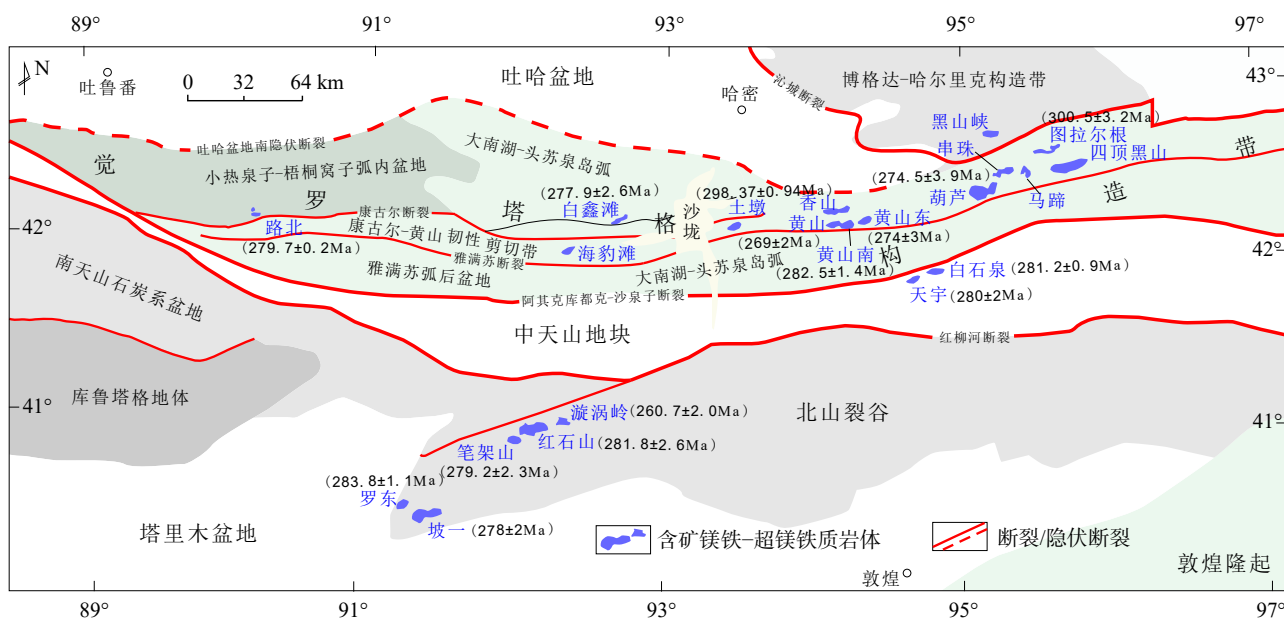


图8 东天山-北山含矿镁铁-超镁铁质侵入岩分布图 (Xiao et al., 2004; Su et al., 2011)

Fig. 8 Distribution of ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Eastern Tianshan-Beishan region(Xiao et al., 2004; Su et al., 2011)

带中的矿床一致, 普遍有俯冲板片流体物质的加入, Nb、Ta、Ti 亏损, 但与阿拉斯加型岩体有显著区别。Nb/Yb–Th/Yb 和 Nb/Yb–TiO₂/Yb 判别图(图 9)显示, 东天山–北山的白鑫滩、路北、白石泉、天宇、黄山、图拉尔根等矿床与峨眉大火成岩省的力马河、金宝山等矿床, 与塔里木大火成岩省的玄武岩一样, 均投点于 Nb/Yb–Th/Yb 判别图(图 9a) MORB–OIB 趋势线上方, 而 Duke Island 阿拉斯加型岩体则落入趋势线内, 明显有别。当然力马河、金宝山与塔里木大火成岩省的玄武岩一样, 在 Nb/Yb–TiO₂/Yb 判别图(图 9b)上均处于 OIB 趋势

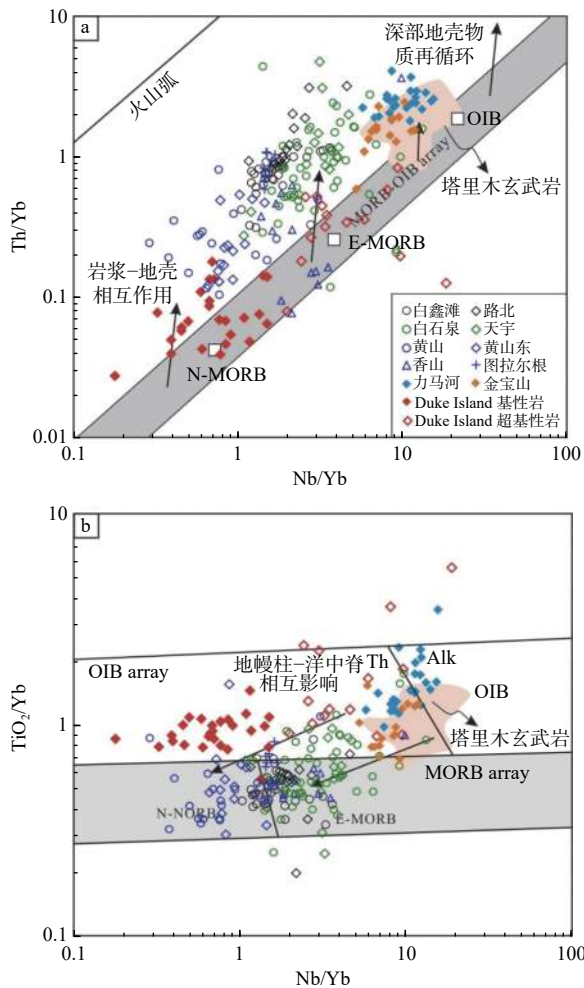


图 9 a—Nb/Yb–Th/Yb 图解; b—Nb/Yb–TiO₂/Yb 图解

图 9 东天山–北山含铜镍钴镁铁–超镁铁岩 Nb/Yb–Th/Yb 和 Nb/Yb–TiO₂/Yb 图解(底图据 Pearce, 2008; 数据来自尤敏鑫, 2022 修改)

Fig. 9 Nb/Yb–Th/Yb diagram and Nb/Yb–TiO₂/Yb diagram of ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Eastern Tianshan–Beishan region(Base map after Pearce, 2008; data modified from You, 2022)

(a) Nb/Yb–Th/Yb diagram; (b) Nb/Yb–TiO₂/Yb diagram

线内, 反映了地幔柱成因, 而东天山–北山矿床则落入 E–MORB 趋势线内, 为地幔柱–洋中脊的地球化学特征(Sun et al., 1975; Schilling et al., 1983; Bougault et al., 1988; Pearce, 2008)。因此, 将东天山–北山岩浆铜镍钴硫化物矿床的地幔源区, 单纯解释为俯冲板片流体交代的亏损地幔源区是不够的, 更不可能是阿拉斯加型岛弧岩浆源区的产物。铬尖晶石和橄榄石计算的初始温度 1303~1412 °C 明显高于软流圈地幔温度(1280~1350 °C; McKenzie and Bickle, 1988), 应该是同时期地幔柱高热动力的贡献。同时, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值和 ε_{Nd}(t) 值落入 OIB 区域的特点, 反映了地幔柱成因的信息(图 10)。

当然俯冲板片流体的贡献是显著的, 且越向北东越有增大的趋势, 这或许与远离地幔柱中心有关。总之, 东天山–北山所代表的中亚造山带中岩浆铜镍钴硫化物矿床的岩浆源区, 显然为天山洋壳自北而南的俯冲板片流体改造的软流圈, 但具有塔里木早二叠世大火成岩省的地幔柱的贡献, 成矿的强度应该与地幔柱的贡献大小有关。

2.4 岩浆铜镍钴硫化物矿床中的钴和铂族元素的富集机制

由于钴在能源电池中的关键作用, 钴的需求在全球大幅增加并被广泛重视。Co²⁺ 聚集于地幔的橄榄石中, 高程度的地幔部分熔融, 能使它进入科马提质和玄武质岩浆之中, 与镍一样主要通过不混溶(熔离)作用而富集于硫化物液相中。岩浆铜镍钴

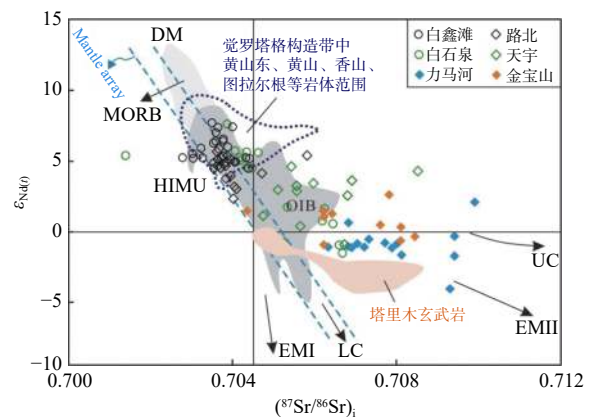


图 10 东天山–北山含铜镍钴镁铁–超镁铁岩 Sr–Nd 同位素对比图解(据 Zhou et al., 2008; 尤敏鑫, 2022 修改)

Fig. 10 Comparison of the Sr–Nd isotope of the ore-bearing mafic-ultramafic intrusions from the Eastern Tianshan–Beishan region(modified from Zhou et al., 2008; You, 2022)

硫化物矿床的平均钴品位为 0.03%，镁铁质岩浆矿床可达 0.06%，超镁铁质岩浆矿床的钴品位可更高一些 (Lightfoot et al., 1993, 1997; Barnes and Lightfoot, 2005; Mudd and Jowitt, 2014; Slack et al., 2017)。尽管目前世界上钴的供给，岩浆铜镍钴硫化物矿床仅占约 23%，其余由沉积岩容矿型铜钴矿 (60%)、红土型镍钴矿 (15%) 和热液脉型钴矿床 (2%) 提供 (Slack et al., 2017)，但岩浆铜镍钴硫化物矿床或者镁铁-超镁铁岩是沉积岩容矿型、红土型和热液脉型钴矿床的母岩或成矿物质来源，而且沉积岩容矿型钴矿主要产于非洲的刚果 (金) 民主共和国，由于政权的不稳定，很难保证它的持续有效供给 (Williams-Jones and Vasyukova, 2022)。因此，岩浆铜镍钴硫化物矿床仍是世界钴的重要来源。尽管钴很早就被利用，据说可以追溯到古埃及，但作为一个新元素，它是于 1735 年由瑞典化学家格奥尔格·勃兰特 (Georg Brandt) 从钴-镍砷化物矿石中加热而分离出来的。钴在自然界以硫化物、硫酸盐和砷化物形式存在，多与镍、铁共生，有时也与铜共生，硫铜钴矿 ($\text{Cu}(\text{Co}, \text{Ni})_2\text{S}_4$)、钴镍黄铁矿 ($(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$)、方硫钴矿 (CoS_2)、块硫镍钴矿 (CoNi_2S_4)、硫钴矿 ($\text{Co}^{2+}\text{Co}^{3+}_2\text{S}_4$)、辉钴矿 (CoAsS)、杂硫砷钴矿 ($(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{AsS}$)、方钴矿 (CoAs_3) 和斜方砷钴矿 ($(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})\text{As}_2$) 是常见钴矿物，表生矿物主要为水钴矿 (HCoO_2)，刚果 (金) 的沉积岩容矿型钴矿就是以水钴矿形式产出。

钴在地幔中的平均含量是 1.02×10^{-4} (Palme and O'Neill, 2014)，在陆壳中只有 2.7×10^{-5} ，下地壳为 3.8×10^{-5} ，上地壳仅约 1.7×10^{-5} (Rudnick and Gao, 2014)，洋壳约为 4.4×10^{-5} (White and Klein, 2014)。岩浆铜镍钴硫化物矿床钴的富集机制主要是部分熔融作用、分离结晶作用和液相不混溶 (熔离) 作用。橄榄岩中的钴最高，辉长岩约为橄榄岩的一半，花岗岩仅为橄榄岩的 5%。因此，只有高程度的部分熔融形成的镁铁质和超镁铁质 (科马提岩) 岩浆才可能有足够量的钴，高程度部分熔融的地幔岩是岩浆硫化物矿床钴得以富集的岩浆源区。这是由于钴的离子半径 (0.75\AA) 介于镁 (0.72\AA) 和铁 (0.78\AA) 之间，倾向集中于橄榄石、辉石等铁镁矿物中，并相容于超镁铁质和镁铁质岩浆的结晶作用所决定的。钴在橄榄石、斜方辉石和单斜辉石中的分配系数依次是 37、13 和 9 (Bédard, 2005, 2007, 2014)，分配系数

决定了钴倾向到橄榄石要超过斜方辉石，到斜方辉石要超过单斜辉石。因而，单纯的分离结晶作用不可能使岩浆硫化物矿床中的钴得以富集，岩浆硫化物矿床中钴要得到富集，主要依靠的仍然是硫化物液相-硅酸盐熔体的不混溶作用。硫饱和是促使硫化物液相-硅酸盐熔体不混溶的关键，要使幔源的玄武质岩浆达到硫饱和，硫的浓度须达到 4×10^{-4} (Mavrogenes and O'Neill, 1999)，而地幔的硫含量才 2×10^{-4} (Palme and O'Neill, 2014)，即使地幔全部熔融也不可能达到硫饱和。因此要使幔源岩浆达到硫饱和，要么改变温度、压力、化学成分和氧逸度 ($f\text{O}_2$)，要么获取外来的硫。岩浆中 $f\text{O}_2$ 突然增加，溶解硫从 S^{2-} 到 S^{4+} 和 S^{6+} 的转变，对硫的饱和度特别重要 (Carroll and Rutherford, 1988; Jugo et al., 2005)，从而实现硫化物液相中钴的富集。

硫化物液相-硅酸盐熔体的钴分配系数与硅酸盐岩浆的 $f\text{S}_2$ 、 $f\text{O}_2$ 和 $\text{FeO}_{\text{总}}$ 的丰度有关，当然同样也与温度相关 (Li and Audétat, 2015)，而且与硅酸盐熔体初始钴的丰度和硅酸盐/硫化物质量比相关。因为：

$$Y_i^{\text{sul}} = (X_i^{\text{sil}} D(1+R)) / (R+D) \quad (1)$$

或

$$Y_i^{\text{sul}} = X_i^{\text{sil}} (D - ((D-1)^* e^{-(1/D^* M)})) \quad (2)$$

式中， Y_i^{sul} 是元素 i 在硫化物液相中的最终富集； X_i^{sil} 是元素 i 在硅酸盐液相中的初始富集， D 是硫化物液相-硅酸盐熔体的分配系数； R 和 N 是硅酸盐/硫化物的质量比值 (Naldrett, 2004)。 R 和 N 指示岩浆的硫化物过饱和的程度，小值反映了非常高的过饱和，大值则反映了相对有限的过饱和。式 (1) 中的参数 R 被用于估算封闭体系硫化物液相与单批次岩浆的平衡反应，式 (2) 中的参数 N 被用于估算开放体系硫化物液相与持续不断的新批次的岩浆的平衡反应。在封闭体系，玄武质岩浆 R 因子等于 1 时，Co 的丰度值是 87×10^{-6} ，当 R 因子提高到 100 和 1000 时，Co 丰度值上升到 1799×10^{-6} 和 2804×10^{-6} ，但 R 因子达到 10000 时，Co 丰度值并没有大的上升，仅提升了 168×10^{-6} (表 2)。这反映了不混溶作用对钴富集的极限。

总之，硫化物液相-硅酸盐熔体的熔离作用，可以使钴得到有效的富集，当硫化物液相的浓度达到能够从硅酸盐熔体中有效地萃取钴，然后由于重力

表 2 玄武质岩浆 R 和 N 因子估算与 Co 的丰度值Table 2 The Co concentration and calculated R and N factors for basaltic magmas

X_i^{sil}	D_i^{sil}	R/N	$Y_i^{\text{sil}}(\text{Co}, \times 10^{-6})$
44	68	1	87/87
44	68	10	422/447
44	68	50	1293/1579
44	68	100	1799/2315
44	68	1000	2804/2992
44	68	10000	2972/2992

(Williams-Jones and Vasyukova, 2022)

沉降而堆积,从而使钴得以富集。因此,钴与镍一样,基本依靠硫化物液相-硅酸盐熔体的不混溶作用得以富集。由于它比镍的丰度值更低,不混溶前是否发生了橄榄石的结晶作用至关重要。东天山-北山岩浆铜镍硫化物矿床与金川矿床相比基本上是贫钴的,其主要原因:一是部分熔融程度远低于金川的岩浆源区;二是深部熔离作用发生前就已经发生了 2% 的橄榄石结晶,钴优先进入橄榄石,而使硫化物液相中钴亏损。此外钴不像铜,铜可以在硫化物液相冷却过程中得到进一步富集,因为硫化物固溶体(MSS)的分离结晶作用使铜更多的保留在残余液相中,而钴在两相之间的初始分配几乎相等,不会再增加富集(Li and Audétat, 2015)。

铂族元素根据地球化学行为可划分为 Ir 亚族(Ru、Rh、Os、Ir)和 Pt 亚族(Pt、Pd),或根据岩浆作用过程中元素共生特征分为 IPGE(Os、Ir 和 Ru)和 PPGE(Rh、Pt 和 Pd)两类(Barnes et al., 2015)。岩浆铜镍钴硫化物矿床是 PGE 的主要来源,全球约 90% 的 PGE 资源蕴藏在岩浆硫化物矿床中(宋谢炎, 2019),但主要集中在少数几个古老的层状杂岩中的超大型 PGE 矿床和岩浆铜镍钴硫化物矿床之中,它们分别是南非的 Bushveld(PGE 金属量 65473 t)、津巴布韦的 Great Dyke(13946 t)、俄罗斯的 Noril'sk-Talnakh(12438 t)、美国的 Stillwater(2621 t)、加拿大的 Sudbury(1933 t)。中国的 PGE 矿床数量少、品位低,除与峨眉大火成岩省有关的金宝山、杨柳坪为以 PGE 为主的岩浆硫化物矿床外,其余均作为伴生元素存在于岩浆铜镍钴硫化物矿床中。但作为伴生元素,不同的岩浆铜镍钴硫化物矿床贫富差别很大,其中两大超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床——金川和夏日哈木,差别最为显著。前者相对

富集 PGE, 获得约 200 t 资源量; 后者 PGE 明显亏损,基本上没有富集到可工业利用程度。因此,加强该两超大型矿床 PGE 特征的对比研究,将有助于揭示中国岩浆铜镍钴硫化物矿床 PGE 的富集机制。

PGE 在地球中的分布,以地核中最高,其次下地幔,再次上地幔,地壳中明显降低(表 3)。可见岩浆铜镍钴硫化物矿床中的 PGE 源于地幔。

表 3 地球不同圈层中的 PGE 丰度 (10^{-9})Table 3 The PGE concentration in different layers of the earth (10^{-9})

位置	Pt	Pd	Os	Ir	Ru	Rh	Σ PGE
地核	13	5.5	8	2.6	16	3	48.1
下地幔	0.2	0.12	0.05	0.05	0.1	0.02	0.54
上地幔	0.2	0.09	0.05	0.05	0.1	0.02	0.51
地壳	0.045	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001	0.059

(据黎彤, 1976; McDonough and Sun, 1995 修改)

实验研究表明, PGE 倾向于进入砷化物、硫化物中, 在硫化物中 IPGE 倾向于进入单硫化物固溶体(MSS), PPGE 倾向于进入残余硫化物液相。在自然界中往往以自然金属、金属互化物、半金属互化物、硫化物和硫砷化物、类质同象(或固溶体)、离子吸附形式存在。其中, 金属互化物(合金, 如 Pt-Pd、Os-Ir-Ru-Pt、Pt-Fe-Cu、Pt-Ni 等)、半金属互化物(如 PdBi、PdBiTe、PdTe₂ 等)、硫化物(如 RuS₂)和硫砷化物(如 PtAs₂、IrAsS 等)是铂族元素重要的矿物类型。PGE 与 Co 一样, 从地幔迁移进入地壳主要通过地幔部分熔融形成的镁铁质岩浆侵入地壳。另外则是蛇绿岩铬铁矿中 PGE 的富集, 可能与洋中脊和俯冲消减折返有关, 文章不予讨论。地幔部分熔融形成的成矿岩浆要获得 PGE 的富集, 可能存在两种机制: 硫化物液相-硅酸盐熔体的熔离作用和岩浆期后的热液作用。部分熔融和熔离作用仍然是造成岩浆铜镍钴硫化物矿床 PGE 能否成矿的关键, 岩浆期后的热液作用尽可能造成局部再富集而成矿(Mountain and Wood, 1988; 李文渊, 1996; Maier and Groves, 2011)。

金川矿床的 PGE 资源储量占据全国的近 60%, 产出大量铂族矿物, 局部形成铂钯富集体, 铂族元素含量整体较高, 铂族矿物主要有砷铂矿、碲铂矿、碲钯矿、黄碲钯矿、方碲钯矿、斜碲钯矿等。韩一筱(2021)对金川矿床 I 矿区、II 矿区和 IV 矿区三个钻孔采样进行 PGE 测试研究显示, 金川含矿岩体

岩石的PGE含量较为均一,显示出Ru、Rh、Ir、Pt亏损,Pd较为富集的特征,但矿石中PGE含量变化很大,Pt、Pd的富集程度远高于Ir、Ru、Rh。硫化物矿石相比岩石PGE含量有显著的富集(图11)。

但遗憾的是没有采集到东段漏斗状岩体2号矿体的样品,I矿区、II矿区的两个钻孔矿石样品应为24号矿体和1号矿体矿石样品,均为金川西段板状岩体及其中所赋矿体的样品(图11a、11b),表现为矿石的PGE含量显著高于岩石,且PPGE(Rh、Pt、Pd)含量相对较高,IPGE(Os、Ir、Ru)含量相对较低,Ru、Rh、Ir与Pd无相关性,表明PGE富集过程中曾发生IPGE与PPGE的分离。值得指出的是,矿床东段东侧IV矿区隐伏岩体和矿体钻孔样品PGE测试分析结果显示,岩石和矿石PGE配分几乎没有分异的特点(图11c),是否代表了东段漏斗状岩体所蕴含的2号矿体的特征,需进一步深入对比研究。以往研究,2号矿体似乎确实没有PGE显著富集(李文渊,1996)。

夏日哈木矿床的PGE呈明显亏损的特征,未发现铂族矿物。两个钻孔样品PGE测试分析结果显示(韩一筱,2021),矿石与岩石PGE组成均一且含量低,没有PGE的富集(图11d)。除Pt外,其他PGE之间极差很小。与金川含矿岩体的岩石相比,PGE含量相近,但Ru、Ir、Pt含量较高、Rh和Pd含量较低且组成更为均一,可能指示了部分熔融程度未能使PGE有效进入岩浆,而硫化物液相-硅酸盐

熔体之间的熔离作用,更未能使Ru、Ir、Pt进入硫化物液相,而是分散在硅酸盐矿物中。金川矿床和夏日哈木矿床PGE富集特征的显著差异,可能反映了两者岩浆源区地幔部分熔融程度的差异。前已述及,金川原始岩浆大致为上地幔20%~30%高程度的部分熔融产物,并具有高 fO_2 而导致硫化物液相-硅酸盐熔体在橄榄石结晶前即发生不混溶作用,而夏日哈木只有15%~25%的部分熔融程度和相对低的 fO_2 ,地幔中的PGE未能足够进入成矿的硅酸盐岩浆,加之橄榄石结晶后或结晶过程中才发生硫化物液相-硅酸盐熔体的不混溶作用,所以夏日哈木就难有PGE的经济富集。金川矿床硫化物矿体较多富集的是PPGE(Rh、Pt、Pd),IPGE(Os、Ir、Ru)与硅酸盐结晶的岩体分异不大,说明金川原始岩浆也并未使地幔中全部PGE进入岩浆。特别是大家比较关注的东段和西段PGE配分上的明显差异(图5),可能是不同批次部分熔融形成的岩浆或不同阶段硫化物液相-硅酸盐熔体不混溶形成的含矿岩浆所致。西段岩体可能是先期深部熔离上侵-贯入的岩浆房,硫化物液相中含有更多的PPGE,而东段岩体是经过熔离后的岩浆再次发生熔离作用后上侵-贯入的岩浆房,硫化物液相中PPGE亏损。另外,岩浆期后的热液作用,可能导致西段矿体热液叠加使PGE再次富集,形成较多铂族矿物,而与东段相别。

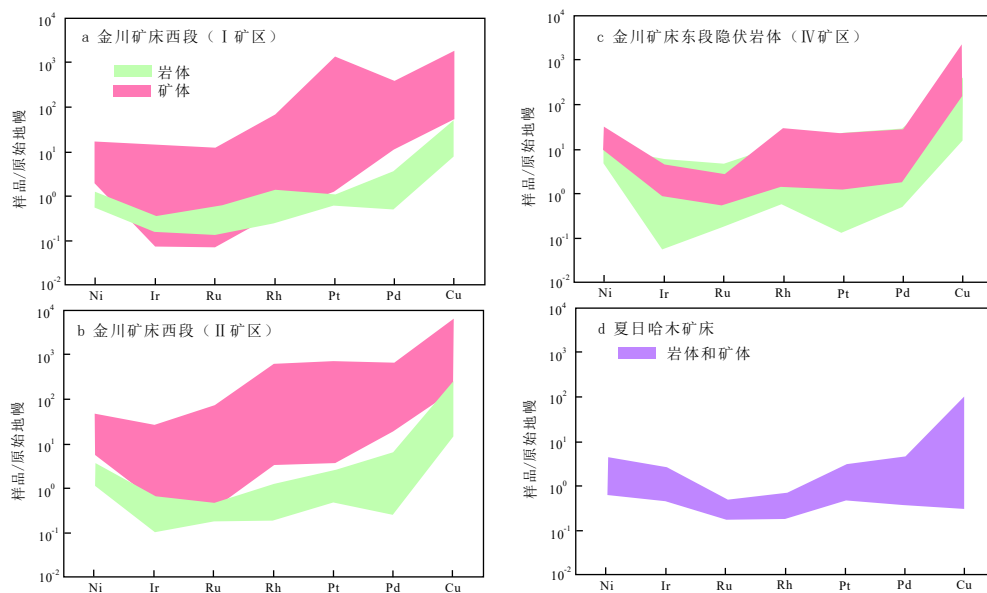


图11 金川和夏日哈木矿床PGE配分曲线(据韩一筱,2021修改)

Fig. 11 Partitioning of PGE between Jinchuan and Xiarihamu magmatic Ni-Cu-Co sulfide deposits(modified from Han, 2021)

3 中国岩浆铜镍硫化物矿床的找矿潜力

3.1 金川超大型矿床深部及周边找矿突破

最近,金川矿床的Ⅲ矿区,即西段含矿岩体(Ⅰ矿区)西侧隐伏岩体(图4,图12),钻探发现了富而厚大的新矿体,估算镍金属资源量近 5×10^5 t,相当于又发现了一个超大型矿床。这是自20世纪60年代发现及勘探金川矿床以来,又一突破性的找矿发现,意义重大。同时,在矿床东段Ⅱ矿区的东侧隐伏的Ⅳ矿区(图4,图12),深部钻探亦有重要发现。这些突破性的找矿发现,表明金川矿床深边部仍有重要的找矿潜力,亟待加强进一步深边部勘查研究。

前已述及,金川含矿岩体是新元古宙形成于地壳10 km深处的近乎水平分布的“岩床”,中新生代的陆内造山运动,使其通过推覆构造 F_1 和 F_2 ,连同龙首山群变质基底作为岩片,推覆至地表风化剥蚀而出露(图2c;汤中立和李文渊,1995;李文渊,

1995, 1996, 1999, 2006a, 2007)。既然是剥蚀的岩床,其当时上侵-贯入的岩浆房的产出,就存在分支、尖灭和再现等特点,甚至不排除在推覆上升的“岩片”内有未裸露的“隐伏岩床”的存在(图2b)。最近,对金川矿床进行三维重建、磁数据反演处理发现,隐伏的Ⅲ矿区和Ⅳ矿区深部重磁异常较已探明的含矿岩体范围要大,同时在周边还有新的重磁异常存在。这些重要发现,无不反映了金川含矿岩体的“分支”或“再现”,甚至“隐伏岩床”的存在(图12),因此,亟待深入研究开展深边部勘查,争取实现更大的勘查突破。同时,开展金川含矿岩体从“岩床”到“岩墙”的构造机理和动力学研究,实现1500 m以浅透明化,为准确定位隐伏矿体提供精准指导。

3.2 特提斯造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的找矿靶区

东昆仑夏日哈木超大型岩浆硫化物矿床的发现,激起了寻找特提斯型岩浆铜镍钴硫化物矿床的

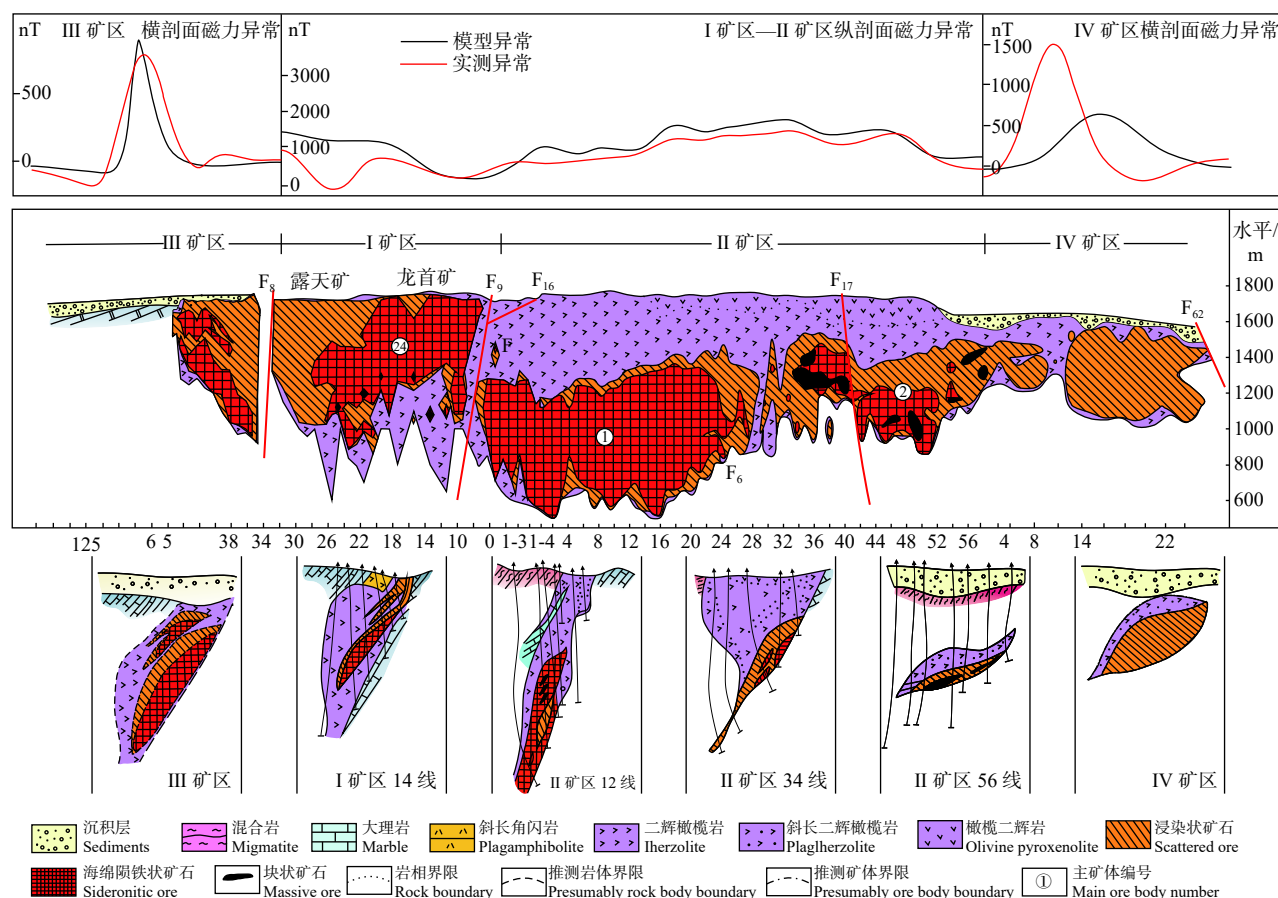


图12 金川岩体磁异常及深边部隐伏岩矿体地质解释图(据李文渊, 1996 修改)

Fig. 12 Diagram of magnetic anomalies and geological interpretation of hidden rock ore bodies in the deep side of the Jinchuan ore-bearing intrusive rock(modified from Li, 1996)

热情。特别是东昆仑及邻区,除夏日哈木矿床外,已发现10余处新矿床(点)。包括石头坑德大型矿床,以及裕龙沟、浪木日、冰沟南和牛鼻子梁等矿床(点)(图13),展示了良好的找矿前景。同时,在祁漫塔格地区新发现了与夏日哈木同时代的玉古萨依等镁铁-超镁铁质岩体,亟待投入勘查研究。

从特提斯型岩浆硫化物矿床形成于地质历史消失的古特提斯裂解环境认识出发(李文渊, 2015, 2018; 李文渊等, 2020, 2021, 2022),由于处于原特提斯和新特提斯构造之间的构造事件,其不仅叠加于原特提斯构造之上,还被新特提斯构造所改造,故早、晚古生代之交的古特提斯裂解地质建造的追溯是一项复杂的地质研究工作,但紧紧抓住特提斯造山带中420 Ma以后镁铁-超镁铁质岩体进行含矿性评价,是加快实现找矿突破的重要捷径。以往调查研究中被划归蛇绿岩组合的镁铁-超镁铁质岩体应是今后小心甄别研究的重点,并非产于缝合带内的镁铁-超镁铁岩就是蛇绿岩的组成,准确定年是重要方法,同时与蛇绿岩区别开来,判断其深部成矿的可能性(李文渊等, 2021, 2022)。现在划分的构造单元,并非是古特提斯裂解时的地质建造,因此地质历史上古特提斯延伸是很长的,凡是古特提斯构造建造存在的地区,理论上都有寻找类似夏日哈木矿床的可能,除东昆仑,秦岭、祁连、阿尔金、西昆仑直至穿过帕米尔构造结到境外,均有找寻特提斯型夏日哈木类型矿床的潜力。

3.3 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的找矿远景区筛选

岩浆铜镍钴硫化物矿床仍是中国镍、钴关键金

属矿产的重要来源,且仍具有重要的找矿潜力。中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的找矿发现历史,总结起来经历了三期大的找矿热潮,每一期都是伴随着一个或两个重要矿床的发现而开始的,且持续10到20年,这是地质工作的规律所决定的。而每一期找矿热潮也需要相当长时间的孕育,需要地质理论认识上的突破。第一期是20世纪60年代金川超大型矿床的找矿突破,找矿高峰期持续了近20年,直至70年代末;第二期是20世纪80年代喀拉通克、黄山东等大型矿床的突破,找矿工作一直延续到21世纪初;第三期是近10年来夏日哈木超大型矿床的重大发现,找矿突破工作至今方兴未艾,但近年来由于遭遇国际国内经济下行形势的影响,勘查研究萎缩。现在亟待加强成矿理论认识上的突破,带动找矿勘查工作的重大突破。

中国岩浆铜镍钴硫化物矿床基本上分布于塔里木、华北和扬子克拉通的边缘及其造山带中(图1, 图14)。成矿时代以新元古代、晚古生代初期和晚古生代晚期三期为特征,对应于中国大地构造在全球大地构造演化中罗迪尼亚超大陆的裂解、冈瓦纳大陆裂解和潘吉亚超大陆裂解三期地质事件(李文渊, 2018; 李文渊等, 2022)。与全球岩浆铜镍钴硫化物矿床的分布相比,缺少地球形成初期新太古代—古元古代地幔柱事件相关的铜镍成矿事件,未发现科马提岩型的镍钴硫化物矿点,也缺乏有巨大工业价值的层状杂岩型PGE矿床(李文渊, 1996),中国最早的具有工业价值的岩浆铜镍钴硫化物矿床形成于新元古代——金川超大型矿床,其余主要产

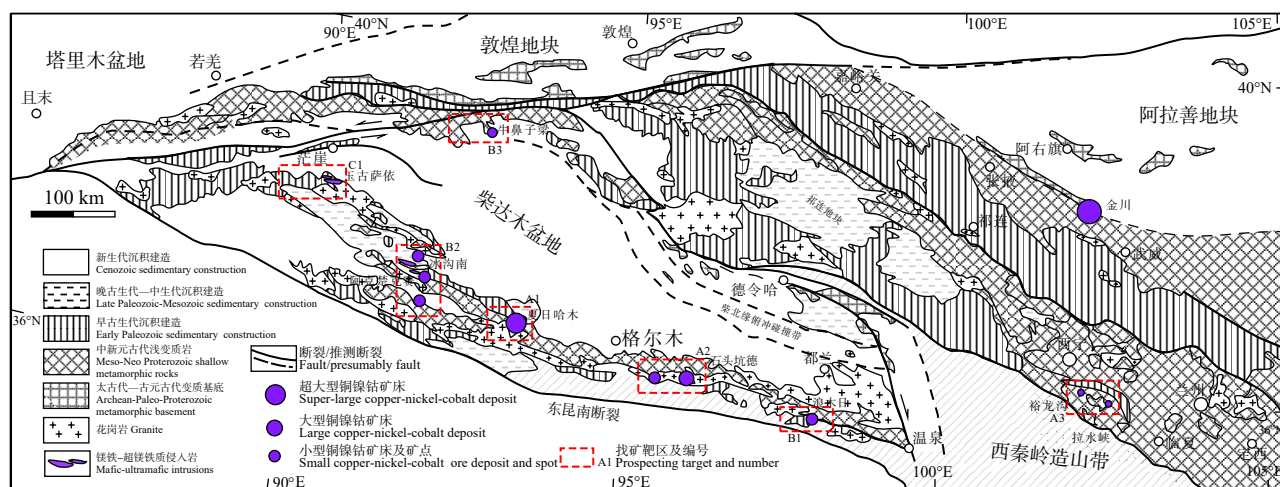


图13 东昆仑及其邻区古特提斯构造带岩浆铜镍钴硫化物矿床找矿靶区分布图

Fig. 13 Distribution of prospecting targets for magmatic nickel-copper-cobalt sulfide deposits in the Paleotethys tectonic belt of East Kunlun and its adjacent areas

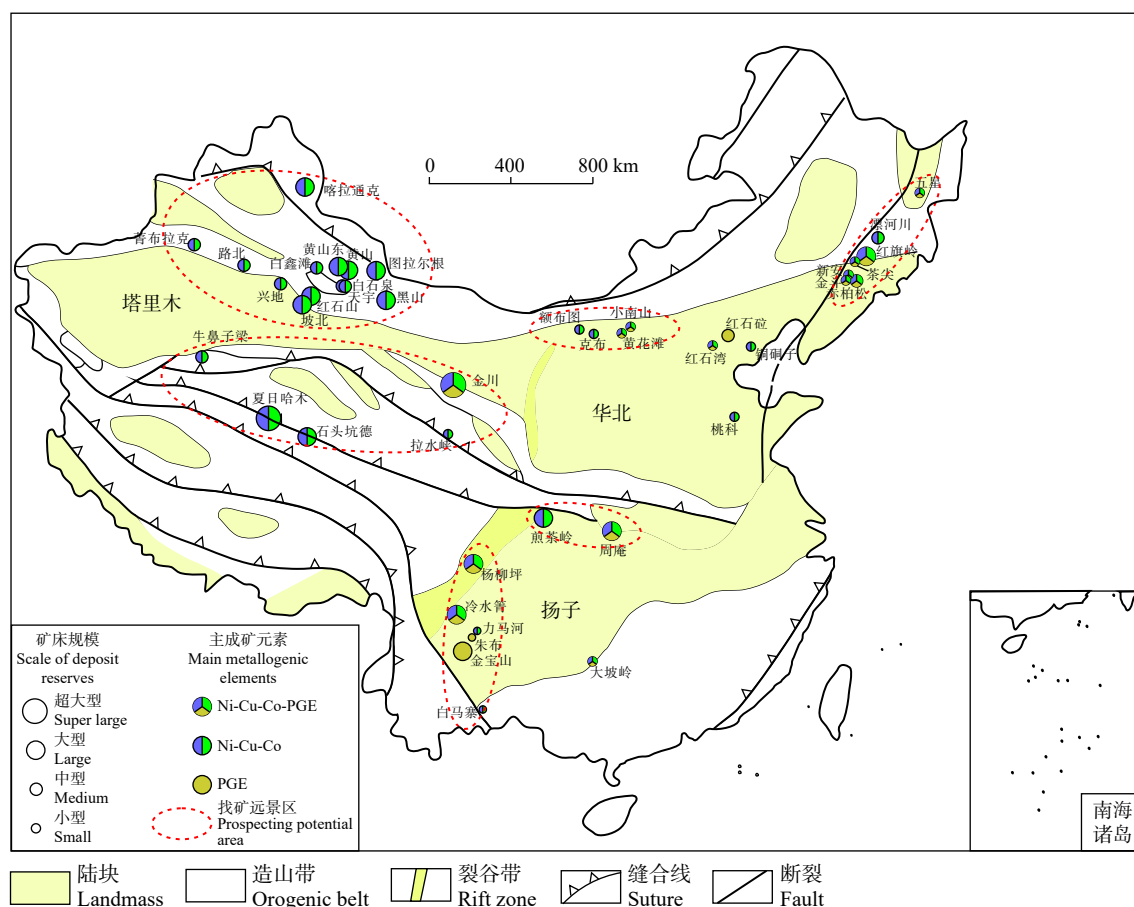


图 14 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床找矿远景区示意图 (中国地图轮廓据自然资源部 GS(2016)1552 号)

Fig. 14 Sketch map of prospecting potential area of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in China (Map of China outline according to the Ministry of Natural Resources, PRC, GS (2016) 1552)

于晚古生代的早、晚期。

成矿背景也有独特之处,形成于大陆裂谷和造山带的伸展环境两种环境,且产于造山带中的矿床数量较多,而与世界不同。造山带中的矿床以特提斯型和中亚型为典型代表,分别以特提斯造山带中的夏日哈木超大型矿床和中亚造山带中的喀拉通克、黄山东等大中型矿床为重要实例。所有具有工业价值的岩浆铜镍钴硫化物矿床,都是幔源岩浆经深部熔离作用上侵-贯入造就的小的镁铁-超美铁质侵入体成矿,即“小岩体成大矿”,且所有的矿床均遭受过中生代陆内造山作用的重新空间位移或改变(李文渊, 2012, 2013)。唯一不同的是,造山带中的矿床,都有俯冲消减洋壳流体对地幔源区的改造,使其部分熔融产生的岩浆形成岩浆铜镍钴硫化物矿床成为可能。与大陆裂谷环境所不同的是形成于造山后的伸展环境或新生陆壳的裂解背景。若要形成较大规模的矿床,必然是大规模高程度部分熔融和大规模硫化物液相-硅酸盐熔体深部

熔离(不混溶)作用的结果,而这需要大的岩石圈裂解事件的发生才有可能,地幔柱仍然是大规模成矿的必要条件。

因此,中国的岩浆铜镍钴硫化物矿床找矿远景区,主要有塔里木东南缘(龙首山-东昆仑-南祁连)、塔里木北缘(东天山-北山(塔里木大火成岩省)、阿尔泰山)、扬子西缘(峨眉大火成岩省)、华北东北缘(吉黑)、华北北缘(内蒙北山)和扬子北缘(周庵)等重点区(图 14)。需要分层次,加强成矿研究,国家投入和社会资金相结合,开展不同类型的找矿调查和勘查评价工作,以期找矿实现重大突破。

4 结论

中国岩浆铜镍钴硫化物矿床的勘查研究已经历了 70 多年的艰苦探索,形成了以汤中立院士提出的“小岩体成大矿”具有重要国际影响力的成矿理论,

取得了金川、夏日哈木等可改变世界矿业格局的找矿成果。现在正面临镍、钴等关键金属矿产国家重大战略需求的新形势,实现岩浆铜镍钴硫化物矿床的重大找矿突破,是地质工作者面临的重大任务。要实现找矿重大突破,必须首先在成矿和勘查理论认识上实现重大突破。

(1)金川超大型矿床形成于新元古代(831~827 Ma)Rodina超大陆裂解环境,阿拉善、塔里木、扬子和澳大利亚等古老陆块裂解的边缘是寻找金川型岩浆铜镍钴硫化物矿床的有利位置。塔里木陆块北缘的兴地矿床和扬子陆块北缘的周庵矿床的发现,表明在这些地区寻找金川型矿床的可能性。

(2)夏日哈木超大型矿床作为特提斯造山带中发现的唯一一例超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床,形成于古特提斯的裂解环境,具有重要科学意义和找矿实用价值的。目前,特提斯造山带还缺乏对离散裂解洋盆打开构造环节的系统研究,特别是处于原特提斯和新特提斯之间的古特提斯构造开启的研究,重塑古特提斯构造的演化和成矿历史,对指导找矿实践具有重要意义。

(3)中亚东天山-北山造山带中众多早二叠世的岩浆铜镍钴硫化物矿床与早二叠世塔里木大火成岩省有共生关系。塔里木、峨眉、西伯利亚三大火成岩省分布于亚欧大陆的东部,时代分别为早二叠世(~280 Ma)、早三叠世(~250 Ma)和晚三叠世(~220 Ma),暗示成因上可能存在密切关系,分别产出全球最大的Noril'sk岩浆铜镍钴硫化物矿床、攀枝花超大型钒钛磁铁矿床及同时代众多岩浆铜镍钴硫化物矿床。它们之间的对比研究,对判别塔里木、峨眉大火成岩省形成重要岩浆铜镍钴硫化物矿床的成矿潜力具有重要意义。

(4)中国岩浆铜镍钴硫化物矿床形成于新元古代、晚古生代早期和晚期,三叠纪之后世界上没再形成岩浆硫化物矿床,但中亚造山带东段五星矿床成矿非常年轻(37.79 ± 0.76 Ma),很可能是一种新的类型,与古太平洋板块向东俯冲洋壳消减物质有关。

致谢:笔者跟随汤中立院士浸淫岩浆铜镍钴硫化物矿床勘查研究近30年,试图对先生在勘查实践中形成并为广大野外勘查者和国内外同行所接受的成矿理论进行进一步解读,特作此拙文,以期对当下岩浆硫化物矿床勘查部署实践和深入研究有所裨益!蒙李四光地质科学奖基金会授予我第

十七届李四光地质科技奖(野外奖),分外感谢和深受激励!《地质力学学报》主编邢树文研究员和特邀主编胡健民研究员为此邀笔者撰写此文,特表示感谢!同时,感谢审稿人百忙中的付出和所提的中肯意见!感谢责任编辑的辛劳!

References

- ARNDT N T, CZAMANSKE G K, WALKER R J, et al., 2003. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits[J]. *Economic Geology*, 98(3): 495-515.
- BARNES S J, LIGHTFOOT P C, 2005. Formation of magmatic nickel sulfide deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents[M]//HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al. One hundredth anniversary volume. Littleton: Society of Economic Geologists: 179-213.
- BARNES S J, MUNGALL J E, MAIER W D, 2015. Platinum group elements in mantle melts and mantle samples[J]. *Lithos*, 232: 395-417.
- BÉDARD J H, 2005. Partitioning coefficients between olivine and silicate melts[J]. *Lithos*, 83(3-4): 394-419.
- BÉDARD J H, 2007. Trace element partitioning coefficients between silicate melts and orthopyroxene: parameterizations of D variations[J]. *Chemical Geology*, 244(1-2): 263-303.
- BÉDARD J H, 2014. Parameterizations of calcic clinopyroxene-melt trace element partition coefficients[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(2): 303-336.
- BEZMEN N I, ASIF M, BRÜGMANN G E, et al., 1994. Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os, and Au between sulfide and silicate melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(4): 1251-1260.
- BOUGAULT H, DMITRIEV L, SCHILLING J G, et al., 1988. Mantle heterogeneity from trace elements: MAR triple junction near 14°N[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 88(1-2): 27-36.
- CARROLL M R, RUTHERFORD M J, 1988. Sulfur speciation in hydrous experimental glasses of varying oxidation state; results from measured wavelength shifts of sulfur X-rays[J]. *American Mineralogist*, 73(7-8): 845-849.
- CRAIG J R, 1979. Geochemical aspects of the origins of ore deposits[M]//SIEGEL F F. Review of research on modern problems in geochemistry. Paris: UNESCO Earth Sciences: 225-271.
- DANG Z C, 2015. Petrology, geochemistry, ages and ore-bearing property evaluation of the mafic-ultramafic intrusions, the middle segment of Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences: 1-116. (in Chinese with English abstract)
- DUAN J, LI C S, QIAN Z Z, et al., 2016. Multiple S isotopes, zircon Hf iso-

- topes, whole-rock Sr-Nd isotopes, and spatial variations of PGE tenors in the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 51(4): 557-574.
- FLEET M E, CROCKET J H, STONE W E, 1996. Partitioning of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2397-2412.
- FRISH W, MESCHDE M, BLAKEY R C, 2011. Plate tectonics-continent drift and mountain building[M]. Heidelberg: Springer: 1-212.
- GE W C, LI X H, LIANG X R, et al., 2001. Geochemistry and geological implications of mafic-ultramafic rocks with the age of ~ 825 Ma in Yuanbaoshan-Baotan area of northern Guangxi[J]. *Geochimica*, 30(2): 123-130. (in Chinese with English abstract)
- HAN B F, JI J Q, SONG B, et al., 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2424-2429.
- HAN Y X, 2021. The comparative study on platinum group elements in Jinchuan and Xiarihamu magmatic Cu-Ni sulfide deposits[D]. Xi'an: Chang'an University: 1-180. (in Chinese with English abstract)
- HAO L B, SUN L J, ZHAO Y Y, et al., 2013. SHRIMP zircon U-Pb dating of Chajian mafic-ultramafic rocks in Hongqiling mine field, Jilin Province, and its implications[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 233-240. (in Chinese with English abstract)
- HORAN M F, WALKER R J, FEDORENKO V A, et al., 1995. Osmium and neodymium isotopic constraints on the temporal and spatial evolution of Siberian flood basalt sources[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(24): 5159-5168.
- JIANG C Y, GUO N X, XIA M Z, et al., 2012. Petrogenesis of the Poyi mafic-ultramafic layered intrusion, NE Tarim Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2209-2223. (in Chinese with English abstract)
- JIANG C Y, LING J L, ZHOU W, et al., 2015. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni-bearing layered mafic-ultramafic intrusion, East Kunlun: implications for its extensional island arc environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 1117-1136. (in Chinese with English abstract)
- JUGO P J, LUTH R W, RICHARDS J P, 2005. An experimental study of the sulfur content in basaltic melts saturated with immiscible sulfide or sulfate liquids at 1300 °C and 1.0 GPa[J]. *Journal of Petrology*, 46(4): 783-798.
- KEAYS R R, 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J]. *Lithos*, 34(1-3): 1-18.
- KEAYS R R, 1997. Requirements for the formation of giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits: the role of magma generation[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 78: F799.
- LARSEN L M, PEDERSEN A K, 2000. Processes in high-Mg, high-*T* magmas: evidence from olivine, chromite and glass in palaeogene picrites from West Greenland[J]. *Journal of Petrology*, 41(7): 1071-1098.
- LI C S, RIPLEY E M, 2011. The giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit: tectonic setting, magma evolution, ore genesis, and exploration implications[M]//LI C S, RIPLEY E M. Magmatic Ni-Cu and PGE deposits: geology, geochemistry, and genesis. Toronto: Society of Economic Geologists: 163-180.
- LI C S, ZHANG Z W, LI W Y, et al., 2015. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China[J]. *Lithos*, 216-217: 224-240.
- LI G H, SUN J G, HUANG Y W, et al., 2010. Zircon U-Pb age of mineral-bearing rock body from Wuxing Pt-Pd deposit in Jidong, Heilongjiang Province and its geological significance[J]. *Global Geology*, 29(1): 28-33. (in Chinese with English abstract)
- LI H Q, CHEN F W, MEI Y P, et al., 2006. Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 463-469. (in Chinese with English abstract)
- LI L X, WANG D H, SONG Q H, et al., 2009. Study on the age of ore-bearing intrusion of Chibosong copper-nickel sulfide deposit in Tonghua, Jilin Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 55-56. (in Chinese)
- LI S J, SUN F Y, GAO Y W, et al., 2012. The Theoretical guidance and the practice of small intrusions forming large deposits—the enlightenment and significance for searching breakthrough of Cu-Ni sulfide deposit in Xiarihamu, East Kunlun, Qinghai[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 185-191. (in Chinese with English abstract)
- LI T, 1976. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. *Geochimica*(3): 167-174. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 1995. Characteristics and exploration countermeasures of copper-nickel sulfide deposit in China[C]//Proceedings of the 2nd annual youth academic conference of China association for science and technology (basic science volume). Beijing: China Press of Science and Technology: 180-190. (in Chinese)
- LI W Y, 1996. Metallogenic series and geochemistry of nickel-copper sulfide deposits in China[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House: 1-228. (in Chinese)
- LI W Y, 1999. Remote metallogenic effect of Continent-Continent collision in the North Qilian Mountains: positioning and structural hydrothermal transformation of deep ore bodies in Longshoushan area[C]//Proceedings of continental structure and inland deformation and the sixth national geomechanics symposium. Beijing: Geological Society of China: 166-169. (in Chinese)
- LI W Y, WANG W, GUO Z P, 2005a. Magmatic Ni-Cu-PGE deposits in the

- Qilian-Longshou mountains, Northwest China-part of a Proterozoic large igneous province[C]//Eighth mineral deposit research: meeting the global challenge. Berlin: Springer: 429-431.
- LI W Y, 2006a. Mineralization and prospecting of metallic sulfide deposit associated with the magmatic activity of Qilian mountain. northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-208. (in Chinese)
- LI W Y, 2006b. Mineral potential of mineral resources in Northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-438. (in Chinese)
- LI W Y, 2007. The current status and prospect on magmatic Ni-Cu-PGE deposits[J]. *Northwestern Geology*, 40(2): 1-28. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 2012. Active global tectonics and ore-forming processes[J]. *Northwestern Geology*, 45(2): 27-42. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, NIU Y L, ZHANG Z W, et al., 2012a. Geodynamic setting and further exploration of magmatism-related mineralization concentrated in the Late Paleozoic in the northern Xinjiang autonomous region[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 41-50. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, TANG L Z, ZHANG Z W, et al., 2012b. The concept of mineralization of the small rock mass and prospecting significance[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 61-68. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 2013. The continental growth and ore-forming processes[J]. *Northwestern Geology*, 46(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 2015. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China[J]. *Geology in China*, 42(3): 365-380. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, ZHANG Z W, CHEN B, 2015. The theory on small intrusions forming large deposits and its exploration significance: taking for magmatic Ni-Cu sulfide deposits example in the northwestern of China[J]. *Engineering Sciences*, 17(2): 29-34. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 2018. The Primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2201-2210. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, ZHANG Z W, WANG Y L, et al., 2019a. Study on the relationship between large-scale magma and metallization in Late Paleozoic in Northern Xinjiang[M]. Beijing: Science Press: 1-324. (in Chinese)
- LI W Y, HONG J, CHEN B, et al., 2019b. Distribution regularity and main scientific issues of strategic mineral resources in Central Asia and Adjacent Regions[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 119-124. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, WANG Y L, QIAN B, et al., 2020. Discussion on the formation of magmatic Cu-Ni-Co sulfide deposits in Margin of Tarim Block[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 276-293. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, ZHANG Z W, GAO Y B, et al., 2021. Tectonic transformation the Kunlun orogen of Paleo-Tethys, North China, and the metallization of critical mineral resource's nickel, cobalt, manganese and lithium[J]. *Geology in China*, [2021-11-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20211118.0847.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, ZHANG Z W, WANG Y L, et al., 2022. Tectonic transformation of Proto- and Paleo-Tethys and the metallization of magmatic Ni-Cu-Co sulfide deposits in Kunlun orogen, Northwest China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(1): 1-19. (in Chinese with English abstract)
- LI X H, SU L, CHUNG S L, et al., 2005b. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: associated with the ~825 Ma south China mantle plume?[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(11): Q11004.
- LI Y, AUDÉTAT, 2015. Effects of temperature, silicate melt composition, and oxygen fugacity on the partitioning of V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, W, Au, Pb, and Bi between sulfide phases and silicate melt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 162: 25-45.
- LIGHTFOOT P C, HAWKESWORTH C J, HERGT J, et al., 1993. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(2): 171-188.
- LIGHTFOOT P C, HAWKESWORTH C J, OLSHEFSKY K, et al., 1997. Geochemistry of Tertiary tholeiites and picrites from Qeqertarsuaq (Disko Island) and Nuussuaq, West Greenland with implications for the mineral potential of comagmatic intrusions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(2): 139-163.
- LIGHTFOOT P C, NALDRETT A J, 1999. Geological and geochemical relationships in the Voisey's Bay intrusion, Nain plutonic suite, Labrador, Canada[M]//KEAYS R R, LESHNER C M, LIGHTFOOT P C, et al. Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration. Toronto: Geological Association of Canada Short Course Notes, 13: 1-30.
- LIU Y G, LÜ X B, WU C M, et al., 2016. The migration of Tarim plume magma toward the northeast in Early Permian and its significance for the exploration of PGE-Cu-Ni magmatic sulfide deposits in Xinjiang, NW China: as suggested by Sr-Nd-Hf isotopes, sedimentology and geophysical data[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 538-545.
- LIU Y G, LI W Y, LÜ X B, et al., 2017. The Pobei Cu-Ni and Fe ore deposits in NW China are comagmatic evolution products: evidence from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and geochemistry[J]. *Geologica Acta*, 15(1): 37-50.
- LIU Y G, LI W Y, JIA Q Z, et al., 2018. The dynamic sulfide saturation process and a possible slab break-off model for the giant xiarihamu magmat-

- ic nickel ore deposit in the east kunlun orogenic belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 113(6): 1383-1417.
- LIU Y G, CHEN Z G, LI W Y, et al., 2019. The Cu-Ni mineralization potential of the Kaimuqi mafic-ultramafic complex and the indicators for the magmatic Cu-Ni sulfide deposit exploration in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 198: 41-53.
- MAIER W D, GROVES D I, 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 46(8): 841-857.
- MAO J W, YANG J M, QU W J, et al., 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance[J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 323-330. (in Chinese with English abstract)
- MAVROGENES J A, O'NEILL H S C, 1999. The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7-8): 1173-1180.
- MCDONOUGH W F, SUN S S, 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253.
- MCKENZIE D, BICKLE M J, 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. *Journal of Petrology*, 29(3): 625-679.
- MITCHELL A H G, GARSON M S, 1981. Mineral deposits and global tectonic settings[M]. London: Academic Press: 1-457.
- MOUNTAIN B W, WOOD S A, 1988. Chemical controls on the solubility, transport and deposition of platinum and palladium in hydrothermal solutions; a thermodynamic approach[J]. *Economic Geology*, 83(3): 492-510.
- MUDD G M, JOWITT S M, 2014. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments[J]. *Economic Geology*, 109(7): 1813-1841.
- NALDRETT A J, 1989. Magmatic sulfide deposits[M]. Oxford: Oxford University Press: 1-196.
- NALDRETT A J, 2004. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration[M]. Berlin: Springer: 1-727.
- PALME H, O'NEILL H S, 2014. Cosmochemical estimates of mantle composition[M]//RUDNICK R L. Treatise on geochemistry. 2nd ed. Oxford: Elsevier: 1-39.
- PEACH C L, MATHEZ E A, KEAYS R R, 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: implications for partial melting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3379-3389.
- lications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 100(1-4): 14-48.
- PEI F P, XU W L, YAN D B, et al., 2005. SHRIMP zircon U-Pb dating and its geological significance of Chibaisong gabbro in Tonghua area, Jilin Province, China[J]. *Science in China Series D*, 49(4): 368-374.
- PIRAJNO F, 2000. Ore deposits and mantle plumes[M]. London: Springer: 1-540.
- PIRAJNO F, 2013. The geology and tectonic settings of China's mineral deposits[M]. Dordrecht: Springer: 1-679.
- QIN K Z, DING K S, XU Y X, et al., 2007. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- QIN K Z, SU B X, SAKYI P A, et al., 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): constraints on a *ca.* Ma mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 311(3): 237-260.
- ROBB L, 2005. Introduction to ore-forming processes[M]. Oxford: Blackwell Science Ltd: 1-373.
- RUDNICK R L, GAO S, 2014. Composition of the continental crust[M]//HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on geochemistry. Oxford: Elsevier: 1-51.
- SAN J Z, QIN K Z, TANG Z L, et al., 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3027-3035. (in Chinese with English abstract)
- SCHILLING J G, ZAJAC M, EVANS R, et al., 1983. Petrologic and geochemical variations along the Mid-Atlantic ridge from 29 Degrees N to 73 Degrees N[J]. *American Journal of Science*, 283(6): 510-586.
- SLACK J F, KIMBALL B E, SHEDD K B, 2017. Cobalt, chapter F[C]//SCHULZ K J, DE Y, J J H, et al. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply. Reston, VA: U. S. Geological Survey: 1-40.
- SONG X Y, YI J N, CHEN L M, et al., 2016. The Giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the east Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 111(1): 29-55.
- SONG X Y, 2019. Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 699-710. (in Chinese with English abstract)
- SU B X, QIN K Z, SAKYI P A, et al., 2011. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: tectonic implications and evidence for an Early-

- Permian mantle plume[J]. *Gondwana Research*, 20(2-3): 516-531.
- SUN S S, TATSUMOTO M, SCHILLING J G, 1975. Mantle plume mixing along the Reykjanes ridge axis: lead isotopic evidence[J]. *Science*, 190(4210): 143-147.
- SUN T, LI C, ZHANG Z Q, et al., 2016. Mineralogical characteristics of Taoke Cu-Ni sulfide deposit in Shandong Province and its indications for metallogenic genesis[J]. *Mineral Deposits*, 35(4): 724-736. (in Chinese with English abstract)
- SUN T, WANG D H, 2019. Geology of mineral resources in China-nickel mining volume[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-912. (in Chinese)
- TANG Q Y, ZHANG M J, LI C S, et al., 2013. The chemical compositions and abundances of volatiles in the Siberian large igneous province: constraints on magmatic CO₂ and SO₂ emissions into the atmosphere[J]. *Chemical Geology*, 339: 84-91.
- TANG Z L, REN D J, XUE Z R, et al., 1989. Nickel deposit in China[M]//Editorial Board of China Mineral Deposits. China mineral deposit (the first volume). Beijing: Geology Press: 104-123. (in Chinese)
- TANG Z L, YANG J D, XU S J, et al., 1992. Sm-Nd dating of the Jinchuan ultramafic rock body, Gansu, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 37(23): 1988-1990.
- TANG Z L, LI W Y, 1995. Mineralization mode and geological comparison of Jinchuan copper-nickel sulfide (including platinum) deposit[M]. Beijing: Geology Press: 1-209. (in Chinese)
- TANG Z L, QIAN Z Z, JIANG C Y, et al., 2006. Magmatic Ni-Cu-pge sulphide deposits and metallogenic prognosis in China[M]. Beijing: Geology Press: 1-304. (in Chinese)
- TAO Y, MA Y S, MIAO L C, et al., 2008. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan Province, SW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 168-172.
- TAO Y, PUTIRKA K, HU R Z, et al., 2015. The magma plumbing system of the Emeishan large igneous province and its role in basaltic magma differentiation in a continental setting[J]. *American Mineralogist*, 100(11-12): 2509-2517.
- The Sixth Geological Team of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, 1984. Baijiazui copper and nickel sulfide deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-198 (in Chinese)
- TUCHSCHERER M G, SPRA J G, 2002. Geology, mineralization, and emplacement of the foy offset dike, sudbury impact structure[J]. *Economic Geology*, 97(7): 1377-1397.
- VOGEL D C, KEAYS R R, 1997. The petrogenesis and platinum-group element geochemistry of the Newer Volcanic Province, Victoria, Australia[J]. *Chemical Geology*, 136(3-4): 181-204.
- VOGT J H L, 1894. Beiträge zur Genetischen Classification der Durch Magmatische Differentiations Prozesse und der Durch Previnathloyse Entstandenen Erzvorkommen[J]. *Z. P. rak. t. Geo. l.*, 2: 381-399.
- WANG G, 2014. Metallogenesis of nickel deposits in Eastern Kunlun orogenic belt, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University: 1-214. (in Chinese with English abstract)
- WANG H S, BAI W J, WAN C Y, 1978. A petro-chemical classification of basic and ultrabasic rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 52(1): 33-39. (in Chinese with English abstract)
- WANG M X, WANG Y, ZHAO J H, 2012. Zircon U/Pb dating and Hf-O isotopes of the Zhouan ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze Block, SW China: constraints on the nature of mantle source and timing of the supercontinent Rodinia breakup[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(7): 777-787. (in Chinese with English abstract)
- WANG R T, HE Y, WANG D S, et al., 2003. Re-Os isotope age and its application to the Jianchaling nickel-copper sulfide deposit, Lueyang, Shaanxi Province[J]. *Geological Review*, 49(2): 205-211. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y, 2006. Petrogenesis of Permian flood basalts and mafic-ultramafic intrusion in the Jinping (SW China) and Songda (Northern Vietnam) districts[D]. Hong Kong, China: University of Hong Kong.
- WHITE W M, KLEIN E M, 2014. Composition of the oceanic crust[M]//RUDNICK R L. Treatise on geochemistry. 2nd ed. Oxford: Elsevier: 457-496.
- WILLIAMS-JONES A E, VASYUKOVA O V, 2022. Constraints on the genesis of cobalt deposits: part I. Theoretical considerations[J]. *Economic Geology*, 117(3): 513-528.
- WU F Y, WAN B, ZHAO L, et al., 2020. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1627-1674. (in Chinese with English abstract)
- XIA L Q, XU X Y, XIA Z C, et al., 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China[J]. *GSA Bulletin*, 116(3-4): 419-433.
- XIA M Z, JIANG C Y, LI C, et al., 2013. Characteristics of a newly discovered Ni-Cu sulfide deposit hosted in the Poyi Ultramafic intrusion, Tarim Craton, NW China[J]. *Economic Geology*, 108(8): 1865-1878.
- XIAO W J, WINDLEY B F, BADARCH G, et al., 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339-342.
- XIAO W J, SONG D F, WINDLEY B F, et al., 2020. Accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: advances and perspectives[J]. *Science China Earth Sciences*, 63(3): 329-361.
- XIAO X C, HE G Q, XU X, et al., 2010. Crustal tectonic framework and geo-

- logical evolution of Xinjiang uygur autonomous region of China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-233. (in Chinese)
- XIE W, SONG X Y, DENG Y Y, et al., 2012. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 144-145: 209-230.
- XU Y G, CHUNG S L, JAHN B M, et al., 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58(3-4): 145-168.
- YAKUBCHUK A, 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: a revised model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 761-779.
- YAKUBCHUK A, 2017. Evolution of the Central Asian orogenic supercollage since Late Neoproterozoic revised again[J]. *Gondwana Research*, 47: 372-398.
- YAN H Q, TANG Z L, WANG Y L, et al., 2010. Zircon U-Pb age and geological significance of Zhouan ore-bearing ultramafic rocks in Henan province[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 531-532. (in Chinese)
- YANG S H, CHEN J F, QU W J, et al., 2007. Re-Os “ages” of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit and their significance[J]. *Geochimica*, 36(1): 27-36. (in Chinese with English abstract)
- YOU M X, 2022. Origin and genetic mechanism of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the western part of Eastern Tianshan region, Xinjiang, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences: 1-246. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C L, YANG D S, WANG H Y, et al., 2011. Neoproterozoic mafic-ultramafic layered intrusion in Qurqutagh of northeastern Tarim Block, NW China: two phases of mafic igneous activity with different mantle sources[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 177-190.
- ZHANG M J, KAMO S L, LI C S, et al., 2010. Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. *Mineralium Deposita*, 45(1): 3-9.
- ZHANG M J, LIU Y G, CHEN A P, et al., 2021. The tectonic links between Palaeozoic eclogites and mafic magmatic Cu-Ni-Co mineralization in East Kunlun orogenic belt, western China[J]. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2021.1885504.
- ZHANG Z B, 2016. Genetic significances from mineralogy of Xiarihamu Ni-Cu sulfide deposit, Eastern Kunlun orogenic belt[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-150. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z C, MAHONEY J J, WANG F S, et al., 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: evidence for a plume-head origin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1538-1552. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z H, WANG Z L, WANG Y B, et al., 2007. Shrimp zircon U-Pb dating of diorite from Qingbulake basic complex in western Tianshan Mountains of Xinjiang and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 353-360. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO G C, WANG Y J, HUANG B C, et al., 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 262-286.
- ZHENG Y F, CHEN Y X, DAI L Q, et al., 2015. Developing plate tectonics theory from oceanic subduction zones to collisional orogens[J]. *Science China Earth Science*, 58(7): 1045-1069.
- ZHENG Y F, XU Z, CHEN L, et al., 2020. Chemical geodynamics of mafic magmatism above subduction zones[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194: 104185.
- ZHOU M F, ARNDT N T, MALPAS J, et al., 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 103(3-4): 352-368.

附中文参考文献

- 党智财, 2015. 内蒙古中部地区镁铁质—超镁铁质岩岩石学、地球化学、年代学及含矿性评价[D]. 北京: 中国地质科学院: 1-116.
- 甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984. 白家咀子硫化铜镍矿床地质[M]. 北京: 地质出版社: 1-198.
- 葛文春, 李献华, 梁细荣, 等, 2001. 桂北元宝山宝坛地区约 825Ma 镁铁—超镁铁岩的地球化学及其地质意义[J]. *地球化学*, 30(2): 123-130.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等, 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁—超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 49(22): 2324-2328.
- 韩一筱, 2021. 金川与夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床铂族元素对比研究[D]. 西安: 长安大学: 1-180.
- 郝立波, 孙立吉, 赵玉岩, 等, 2013. 吉林红旗岭镍矿田茶尖岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 38(2): 233-240.
- 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 等, 2012. 塔里木板块东北部坡—镁铁质—超镁铁质层状侵入体岩石成因[J]. *岩石学报*, 28(7): 2209-2223.
- 姜常义, 凌锦兰, 周伟, 等, 2015. 东昆仑夏日哈木镁铁质—超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景[J]. *岩石学报*, 31(4): 1117-1136.
- 李光辉, 孙景贵, 黄永卫, 等, 2010. 黑龙江鸡东五星铂钯矿床含矿岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *世界地质*, 29(1): 28-33.
- 李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 等, 2006. 新疆坡北基性—超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 25(4): 463-469.
- 李立兴, 王登红, 松权衡, 等, 2009. 吉林通化赤柏松铜镍硫化物矿床

- 含矿岩体之时代研究[J]. *矿物学报*, 29(S1): 55-56.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 等, 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践: 青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义[J]. *西北地质*, 45(4): 185-191.
- 黎彤, 1976. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学* (3): 167-174.
- 李文渊, 1995. 中国铜镍硫化物矿床特征及勘查对策[C]//中国科学技术协会第二届青年学术年会论文集(基础科学分册). 北京: 中国科学技术出版社: 180-190.
- 李文渊, 1996. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 西安地图出版社: 1-228.
- 李文渊, 1999. 北祁连山陆-陆碰撞的远程成矿效应: 龙首山地区深成矿体定位及构造热液改造[C]//大地构造及陆内变形暨第六届全国地质力学学术讨论会论文集. 北京: 中国地质学会: 166-169.
- 李文渊, 2006a. 祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社: 1-208.
- 李文渊, 2006b. 西北地区矿产资源找矿潜力[M]. 北京: 地质出版社: 1-438.
- 李文渊, 2007. 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究现状及发展趋势[J]. *西北地质*, 40(2): 1-28.
- 李文渊, 2012. 超大陆旋回与成矿作用[J]. *西北地质*, 45(2): 27-42.
- 李文渊, 牛耀龄, 张照伟, 等, 2012a. 新疆北部晚古生代大规模岩浆成矿的地球动力学背景和战略找矿远景[J]. *地学前缘*, 19(4): 41-50.
- 李文渊, 汤中立, 张照伟, 等, 2012b. 对小岩体成矿的认识及其找矿意义[J]. *西北地质*, 45(4): 61-68.
- 李文渊, 2013. 大陆生长演化与成矿作用讨论[J]. *西北地质*, 46(1): 1-10.
- 李文渊, 2015. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. *中国地质*, 42(3): 365-380.
- 李文渊, 张照伟, 陈博, 2015. 小岩体成大矿的理论及找矿实践意义: 以西北地区岩浆铜镍硫化物矿床为例[J]. *中国工程科学*, 17(2): 29-34.
- 李文渊, 2018. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. *岩石学报*, 34(8): 2201-2210.
- 李文渊, 张照伟, 王亚磊, 等, 2019a. 新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究[M]. 北京: 科学出版社: 1-324.
- 李文渊, 洪俊, 陈博, 等, 2019b. 中亚及邻区战略性关键矿产的分布规律与主要科学问题[J]. *中国科学基金*, 33(2): 119-123.
- 李文渊, 王亚磊, 钱兵, 等, 2020. 塔里木陆块周缘岩浆 Cu-Ni-Co 硫化物矿床形成的探讨[J]. *地学前缘*, 27(2): 276-293.
- 李文渊, 张照伟, 高永宝, 等, 2021. 昆仑古特提斯构造转换与镍钴锰锂关键矿产成矿作用研究[J]. *中国地质*, [2021-11-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20211118.0847.002.html>.
- 李文渊, 张照伟, 王亚磊, 等, 2022. 东昆仑原、古特提斯构造转换与岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿作用[J]. *地球科学与环境学报*, 44(1): 1-19.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 等, 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义[J]. *矿床地质*, 21(4): 323-330.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等, 2005. 吉林通化赤柏松辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 35(5): 393-398.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等, 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. *矿床地质*, 26(1): 1-14.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等, 2010. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(10): 3027-3035.
- 宋谢炎, 2019. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题[J]. *矿床地质*, 38(4): 699-710.
- 孙涛, 李超, 张增奇, 等, 2016. 山东桃科铜镍矿床矿物学特征及其对矿床成因的指示[J]. *矿床地质*, 35(4): 724-736.
- 孙涛, 王登红, 2019. 中国地质矿产志-镍矿卷[M]. 北京: 地质出版社: 1-912.
- 汤中立, 任端进, 薛增瑞, 等, 1989. 中国镍矿床[M]//《中国矿床》编委会. 中国矿床-上册. 北京: 地质出版社: 104-123.
- 汤中立, 杨杰东, 徐士进, 等, 1992. 金川含矿超铁镁岩的 Sm-Nd 定年[J]. *科学通报*, 37(10): 918-920.
- 汤中立, 李文渊, 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社: 1-209.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等, 2006. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社: 1-304.
- 陶琰, 马言胜, 苗来成, 等, 2008. 云南金宝山超镁铁岩体锆石 SHRIMP 年龄[J]. *科学通报*, 53(22): 2828-2832.
- 王冠, 2014. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学: 1-214.
- 王恒升, 白文吉, 宛传永, 1978. 基性岩与超基性岩的岩石化学分类[J]. *地质学报*, 52(1): 33-39.
- 王梦玺, 王焰, 赵军红, 2012. 扬子板块北缘周缘超镁铁质岩体锆石 U/Pb 年龄和 Hf-O 同位素特征: 对源区性质和 Rodinia 超大陆裂解时限的约束[J]. *科学通报*, 57(34): 3283-3294.
- 王瑞廷, 赫英, 王东生, 等, 2003. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 49(2): 205-211.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等, 2020. 特提斯地球动力学[J]. *岩石学报*, 36(6): 1627-1674.

- 肖序常,何国琪,徐新,等,2010.中国新疆地壳结构与地质演化[M].北京:地质出版社:1-233.
- 闫海卿,汤中立,王亚磊,等,2010.河南周庵含矿超镁铁岩体锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].*矿床地质*, 29(S1): 531-532.
- 杨胜洪,陈江峰,屈文俊,等,2007.金川铜镍硫化物矿床的 Re-Os “年龄”及其意义[J].*地球化学*, 36(1): 27-36.
- 尤敏鑫,2022.新疆东天山西段岩浆铜镍硫化物矿床岩浆起源与成矿机制[D].北京:中国地质科学院:1-246.
- 张志炳,2016.东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿床矿物成因意义探讨[D].北京:中国地质大学(北京):1-150.
- 张招崇,MAHONEY J J,王福生,等,2006.峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学:地幔柱头部熔融的证据[J].*岩石学报*, 22(6): 1538-1552.
- 张作衡,王志良,王彦斌,等,2007.新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J].*矿床地质*, 26(4): 353-360.

获奖者简历:

李文渊,中国地质调查局西安地质调查中心二级研究员、中国地质科学院博士生导师。2021年获得第17次李四光地质科学奖野外奖。现任自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室主任、中国-上海合作组织地学合作研究中心首席科学家。长期从事岩浆铜镍硫化物矿床和区域成矿学研究。出版专著15部(第一作者或独著9部),发表论文139篇(第一作者或独著48篇)。荣获国家科技进步奖二等奖1项(R6),新疆自治区人社厅、新疆自治区国土厅优秀成果特等奖1项(R1),部省一等奖4项(R4、R5、R7、R8)、二、三等奖各1项(R2、R1)。享受国务院政府特殊津贴,入选国家百千万人才工程、自然资源部国土资源科技领军人才计划,自然资源部岩浆作用成矿与找矿科技创新团队带头人,陕西省突出贡献专家。

